Développement d'un outil de gestion intégrant les risques économiques pour la réhabilitation des sites contaminés

C4H5O2_5   2/ 9/99 THERMC   4H   5O   2   0G   300.000 5000.000 1392.000   1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14   2



RECORD 02-0507/2A

mai 2004



ETUDE N° 02-0507/2A

DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE GESTION INTEGRANT LES RISQUES ECONOMIQUES POUR LA REHABILITATION DES SITES CONTAMINES

RAPPORT FINAL

mai 2004

R. SAMSON, G. BAGE - Ecole Polytechnique de Montréal

www.record-net.org

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.
Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

  RECORD, Développement d'un outil de gestion intégrant les risques économiques pour la réhabilitation des sites contaminés, 2004, 157 p, n°02-0507/2A.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
  www.ademe.fr

Résumé

Ce rapport conclut une première phase de conception d'un outil informatique innovateur qui permettra, à terme, aux gestionnaires de sites contaminés de prendre les décisions optimales en matière de réhabilitation de ces sites. L'objectif principal du projet était de développer les bases d'un logiciel (appelé ici « SITE VII ») permettant une approche globale et rigoureuse de comparaison de scénarios de restauration de sites contaminés aux hydrocarbures pétroliers. Au cours de la période visée par cette première phase du projet, la Chaire industrielle CRSNG en assainissement et gestion des sites de l'École Polytechnique de Montréal a réalisé quatre étapes en vue de la conception d'un outil informatique utilisable par tout gestionnaire sur une simple plate-forme informatisée. Ces quatre étapes sont : le raffinement du modèle d'évaluation technico-économique, le développement de banques de données pour cinq technologies de restauration des sols, la mise sur papier d'une structure d'intégration des informations au modèle technico-économique et la simulation de la restauration d'un site contaminé par l'entremise du modèle et de certaines banques de données déjà créées constituent.

Dans le rapport d'étape, l'emphase avait été mise sur le développement du modèle technico-économique, appuyé par une très simple simulation de restauration à l'aide d'une seule technologie. Dans le présent rapport, la priorité a été mise sur l'intégration des différentes composantes nécessaires à la création d'un logiciel d'aide à la gestion dont le modèle technico-économique en est le cœur. Un chapitre entier du rapport est consacré à l'élaboration de la structure de décision du logiciel. Le traitement de l'information y est schématisé et exposé étape par étape.

Sur le plan des technologies abordées par le logiciel, cinq technologies ont été détaillées, à savoir, la bioventilation *in situ*, le traitement en biopile (biotertre), la bioaspiration *in situ*, le biobarbotage et la désorption thermique. Pour chaque technologie, une fiche technologique a été créée. Celle-ci contient une brève description de la technologie, de sa performance, une énumération des critères d'applicabilité et une présentation des coûts de traitement selon les plages les plus couramment rencontrées dans la littérature. Pour la bioventilation *in situ* et le traitement en biopile, en raison de leur utilisation dans les simulations exposées au présent rapport, une liste des besoins en équipements, établie suite au dimensionnement des technologies, accompagne les fiches technologiques.

Par ailleurs, plutôt que de créer des bases de données économiques pour chaque technologie intégrée au logiciel, la mise en place de bases de données généralisées pour toutes les technologies et spécifiques à diverses opérations de restauration (ex. analyses en laboratoire, système d'extraction d'air) a été retenue. Les bases de données spécifiques à une technologie pour un site donné seront créées à partir de ces bases générales à chaque simulation selon les besoins des technologies. Ceci permet une plus grande souplesse dans l'évaluation économique de chaque technologie et facilite une éventuelle mise à jour des coûts en ne nécessitant qu'une seule modification, peu importe que l'élément modifié soit utilisé par une ou plusieurs technologies. Douze simulations ont été réalisées pour la restauration d'un site virtuel contaminé au diesel. Chaque simulation est contrainte par une durée maximale de restauration et/ou un bénéfice maximal associé au site restauré. La complexité de certaines stratégies optimales de restauration fait ressortir le besoin pour les gestionnaires de sites d'un outil, tel que le logiciel SITE VII.

Finalement, les bases du logiciel ayant été établies, ce rapport présente une série de recommandations pour des travaux futurs dans l'optique de finaliser la conception du logiciel SITE VII, de manière à ce qu'il soit complet, fonctionnel et doté d'une interface conviviale.

Mots-clés : Traitement des sites contaminés; outils de gestion / Key Words: Site remediation; decision support system

Tables des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des équations

Lexique

Ce lexique définit les termes couramment utilisés dans ce rapport. Les termes sont présentés par ordre alphabétique mais peuvent faire référence à d'autres termes définis par la suite.

Biopile

Biotertre

Efficacité d'une technologie

Probabilité d'atteindre avec une technologie donnée et en une période donnée, un état de site donné à partir d'une situation fixée.

État du site

Distribution de probabilités de l'ensemble des situations possibles.

Indice de risque

Ratio entre l'écart-type des valeurs de tous les scénarios composant une stratégie et la valeur de cette dernière.

Période

Espace de temps fixé *a priori* et caractérisant le passage d'un état à un autre par l'utilisation d'une seule technologie.

Potentiel d'applicabilité

Synonyme d'efficacité d'une technologie.

Scénario de restauration

Une séquence de décisions de technologies, avec ou sans information supplémentaire, permettant de passer d'un état initial à un état final du site, en une ou plusieurs étapes. Un scénario est spécifique à une situation du site par période et une efficacité d'une technologie.

Simulation par la valeur d'un projet (SVP)

Simulation réalisée en utilisant la valeur générée par la réalisation d'un projet comme bénéfice de restauration.

Simulation par la valeur marchande du site (SVM)

Simulation réalisée en utilisant la valeur marchande du site comme bénéfice de restauration.

Situation du site

Plage de concentrations à l'intérieur de laquelle la concentration moyenne de la zone à traiter peut se situer.

Situation réelle

Plage de concentrations à l'intérieur de laquelle se situe véritablement la concentration moyenne de la zone à traiter. Terme utilisé lorsqu'il y a certitude sur la situation du site. Dans ce cas, l'état du site associe une probabilité de 100 % à la situation réelle et une probabilité nulle à toutes les autres.

Stratégie de restauration

Ensemble de scénarios de restauration ayant pour point commun le choix de la même technologie à une période donnée. Les scénarios composant la stratégie diffèrent entre eux par la situation à laquelle ils s'appliquent et l'état qu'ils permettent d'atteindre à la fin de la période. La stratégie de restauration couvre l'ensemble des périodes, du début jusqu'à la fin de la restauration.

Stratégie optimale de restauration (SOR)

De toutes les stratégies de restauration générées lors d'une simulation, celle ayant la valeur espérée la plus grande.

Valeur d'un scénario

Différence entre les bénéfices associés au site restauré (partiellement ou en totalité) et les coûts de traitement (de toutes les technologies associées au scénario) et les coûts d'acquisition d'information supplémentaire (si nécessaire).

Valeur d'option

Contrairement à la valeur d'option théorique, cette valeur considère que l'acquisition d'information est payante. Ainsi, cette valeur d'option est inférieure, du coût de l'acquisition, à la valeur d'option théorique.

Valeur d'option théorique

Gain réalisé par le report d'une action ou décision irréversible, en situation d'incertitude sur la situation du site, afin d'acquérir de l'information à propos de la situation réelle du site pour, par la suite, choisir d'appliquer ou non l'action ou la décision. Ce gain est établi par rapport à la valeur d'appliquer immédiatement l'action ou la décision en incertitude. L'acquisition d'information est gratuite. Cette valeur d'option est dite *théorique* puisqu'elle est équivalente à celle retrouvée dans la littérature économique.

Valeur espérée d'une stratégie de restauration

Moyenne pondérée des valeurs des scénarios composant la stratégie. La pondération se fait par la probabilité d'occurrence de chaque scénario.

Technologie irréversible

Technologie modifiant de façon permanente la nature du site. Toute technologie nécessitant une excavation du sol à traiter est considérée comme irréversible.

Nomenclature

n	Nombre de périodes restantes
s	Situation du site, niveau de contamination
S	Ensemble de toutes les situations possibles
q	État du site, distribution de probabilités de toutes les situations possibles, niveau de connaissances que possède le décideur à propos du site, vecteur de S
q'	Nouvel état du site résultant d'une restauration partielle ou totale du site par l'utilisation d'une biotechnologie, vecteur de S
$q(s)$	Probabilité d'occurrence de la situation s du site, un élément du vecteur q
$Q(s)$	Ensemble de tous les états possibles, $Q(s)=\{q \in \Re^{\|S\|} \mid q(s)\geq 0 ; \sum q(s)=1\}$
$V_n(q)$	Valeur totale optimale de la restauration du site définie par l'état q et pour lequel n période sont encore possibles
t	Technologie spécifique de restauration
$T(s)$	Ensemble de toutes les technologies de restauration disponibles pour traiter un site de situation s, contaminé au niveau s
$T(q)$	Ensemble de toutes les technologies de restauration disponibles pour traiter un site de situation inconnu mais représenté (caractérisé) par un état q
$C(s,t)$	Coûts de traitement pour une technologie de restauration t appliquée sur un site de situation s, contaminé au niveau s
α	Taux d'actualisation
$P(q'\|s,t)$	Probabilité d'atteindre par l'utilisation d'une technologie de restauration t un état du site q' à partir d'une situation initiale s
$I(q)$	Coûts d'acquisition d'information lorsque le site est représenté par un état q, également définis comme les coûts de caractérisation
$R(q)$	Valeur du site, non traité ou restauré totalement ou en partie, ou valeur d'un projet pouvant être réalisé sur le site dont le niveau de contamination est inconnu mais représenté par un état q.

Introduction

Le processus d'identification de la technologie la plus appropriée pour la restauration d'un site contaminé peut rapidement devenir un casse-tête pour un gestionnaire selon la complexité du site, l'éventail des technologies de restauration applicables, les coûts qui leurs sont associés , leur efficacité et l'incertitude entourant le degré de contamination du site. Une erreur dans l'identification de la technologie retenue peut être lourde de conséquences, aussi bien techniquement qu'économiquement.

Danse ce contexte, il est important de développer des outils permettant une utilisation synergique et optimale des données scientifiques, technologiques et économiques dans la prise de décision. La Chaire industrielle CRSNG en assainissement et gestion des sites de l'École Polytechnique de Montréal a développé un savoir-faire dans la conception d'outils appliqués à la gestion des sites contaminés. Ce projet vise la conception d'un outil informatique novateur qui, à terme, permettra aux gestionnaires d'optimiser leurs décisions en matière de réhabilitation des sites, quant à la séquence des technologies à appliquer, la quantité d'informations nécessaires afin que ces décisions représentent un risque acceptable pour les gestionnaires.

Le travail réalisé dans le cadre de ce projet comprend :

1. le développement et le raffinement du modèle technico-économique d'évaluation des stratégies de restauration;
2. le développement de banques de données économiques générales et regroupées selon des actions et/ou étapes de restauration communes à une ou plusieurs technologies;
3. la mise en place d'une structure de traitement des données et des décisions dans le but de réaliser, ultérieurement, un véritable outil informatisé de gestion des sites, le logiciel SITE VII;
4. une première véritable utilisation du modèle technico-économique et des banques de données pour la simulation de la restauration d'un site virtuel sous différentes contraintes temporelles et économiques.

Depuis la présentation du rapport d'étape, l'accent a été mis principalement sur deux aspects. Premièrement, la création des bases de données économiques permettant l'évaluation des coûts de réhabilitation par cinq technologies, la bioventilation *in situ*, le traitement en biopile (biotertre), la bioaspiration *in situ*, le biobarbotage et la désorption thermique. Deuxièmement, la définition d'une vue d'ensemble du logiciel SITE VII et des interactions entre les différentes sources d'information et le modèle technico-économique ainsi que de la forme des réponses des simulations.

Note : Les coûts présentés dans ce rapport proviennent de sources de données américaines et canadiennes. Ces coûts ont été utilisés uniquement dans le but de démontrer et de valider la logique du modèle développé. Toutefois, pour faciliter la lecture par les partenaires européens au projet, un certain nombre de ces coûts ont été convertis en euros. Par ailleurs, quoique les bases de données intégrées dans le modèle aient été conçues pour permettre un maximum de flexibilité et ainsi offrir à l'utilisateur la possibilité d'y adapter ses propres données, la prochaine phase du projet inclura des données relatives aux coûts de traitement qui prévalent sur le marché européen.

1 Présentation du modèle technico-économique à la base de l'outil

1.1 Généralités

Plusieurs raisons peuvent justifier la décontamination d'un site : une obligation par une loi ou un règlement externe, une décision interne, un souci de conformité environnementale ou la réalisation un projet d'infrastructure sur le site visé. Peu importe le motif, un double objectif sera toujours présent dans l'approche du plan de restauration du site, à savoir : atteindre les critères de décontamination et respecter une enveloppe budgétaire préalablement fixée. À ces deux objectifs est également imposé un échéancier. Face à ces objectifs, le choix de la technologie de restauration du site est crucial. Sélectionner une mauvaise technologie peut engendrer des conséquences négatives importantes, que ce soit sur le budget, les objectifs de décontamination, l'échéancier ou sur les trois à la fois. Le choix judicieux de la technologie de restauration s'impose donc.

La problématique entourant la restauration d'un site contaminé est composée notamment d'une connaissance imparfaite du site et de son niveau de contamination. Ceci est dû en partie à son hétérogénéité et à la dispersion du contaminant dans les sols et les eaux souterraines. Une caractérisation du site révélera, avec une certaine précision, sa situation actuelle, mais seulement en certains points spécifiques. La caractérisation pourrait ne pas prendre en considération des « points chauds » (« hot spots ») de contamination ou à l'inverse, considérer certains points chauds comme représentatifs de l'ensemble de la contamination qui prévaut sur le site. De plus, la quantité et l'emplacement des points d'échantillonnage vont influencer l'idée que l'on se fera du niveau de contamination du site. Des points trop rapprochés et de concentrations similaires vont trop influencer une éventuelle moyenne du niveau de contamination. Une caractérisation exhaustive de l'ensemble du site n'étant souvent pas envisageable pour des raisons principalement économiques, un juste-milieu doit être établi entre le coût de la caractérisation et le niveau de certitude recherché par-rapport à la situation du site. Puisque le choix de la technologie de restauration dépend à la fois du potentiel d'applicabilité de la technologie et des coûts d'application de cette dernière, et que ces deux éléments de décision sont fonction de la caractérisation du site, un lien direct peut être fait entre le degré de certitude face à la contamination du site et la pertinence de la technologie sélectionnée.

Devant une telle complexité, il a été jugé approprié de développer un modèle de gestion des sites contaminés permettant de guider le choix de la technologie de restauration en fonction de la qualité et de la quantité des informations connues à propos d'un site. À partir d'un modèle simple d'analyse coûts-bénéfices, modèle couramment utilisé en économie, un modèle technico-économique permettant de sélectionner la stratégie de restauration la plus appropriée à un site donné a été développé, le modèle METEORS (*Model evaluating the technically and economically optimal remediation strategy*). Une description complète du développement du modèle et une première application à la restauration d'un site virtuel pourront sous peu être consulter respectivement dans Bage et al. (Soumis, 2001-a) et Bage et al. (Soumis, 2001-b). Plus complet qu'un modèle simple d'analyse coûts-bénéfices, ce nouveau modèle intègre la gestion des incertitudes et les probabilités d'obtenir un bénéfice suite à la restauration du site.

1.2 Description du modèle METEORS

Le modèle développé évalue la valeur de la restauration d'une zone prédéfinie sur le site. Cette zone peut être l'ensemble du site ou une partie fortement contaminée. Plus le niveau de contamination de la zone à l'étude est hétérogène, plus il y a d'incertitude dans les scénarios de restauration. Différentes plages de concentrations en contaminants sont fixées (les situations), elles servent à évaluer la progression de la restauration en évaluant l'efficacité d'une technologie à faire passer le niveau de contamination d'une plage à une autre. Puisque les connaissances à

propos du site et de la contamination sont limitées, il peut être difficile de déterminer avec exactitude dans quelle situation est le site avant d'entreprendre sa restauration, de même que durant le traitement. C'est pour cette raison que le modèle considère aussi l'état du site, c'est-à-dire une distribution des probabilités d'occurrence de chacune des situation*s*. Ainsi, même si un décideur ne peut savoir quelle est la véritable situation du site, c'est-à-dire dans quelle plage se situe la concentration moyenne, il peut. en revanche. en connaître le profil des situation*s* possibles, c'est-à-dire savoir quelle est la probabilité d'une situation donnée. À partir de ces deux concepts de situation et d'état, différentes variables sont mises en relation pour former le modèle technico-économique *METEORS*. Les valeurs de ces variables sont traitées par deux modules.

Le premier de ces modules, le module technique, a quatre fonctions principales. Premièrement, il évalue, à partir des données de caractérisation du site, les probabilités d'occurrence que le site soit réellement contaminé (concentration moyenne) à l'intérieur d'une plage donnée. L'ensemble de ces probabilités forme un vecteur représentant l'état du site. Deuxièmement, il évalue, par simulation géostatistique, une concentration moyenne pour le contaminant cible sur l'ensemble de la zone à l'étude. Cette concentration moyenne prend en considération la variabilité entre les points d'échantillonnage, variabilité s'exprimant à la fois par la distance relative entre les points et par la concentration entre chacun d'eux. Troisièmement, il calcule, pour chaque technologie de restauration, le potentiel d'applicabilité de cette dernière à la problématique spécifique du site. Pour ce faire, le module compare les valeurs des paramètres du site influençant la technologie à l'étude par rapport aux valeurs optimales pour ce type de traitement. Parmi ces paramètres, certains ont davantage d'influence que d'autres sur un traitement. La similitude entre la valeur de ces paramètres et la valeur optimale est cruciale pour obtenir un potentiel d'applicabilité élevé. À ce potentiel, un facteur de quasi-contrôle est ajouté pour pondérer l'applicabilité de la technologie en fonction de son efficacité à éliminer ou à dégrader une masse donnée de contaminants. Ce potentiel d'applicabilité pondéré est considéré par la suite dans le modèle technico-économique comme étant la probabilité d'atteindre, à partir d'une situation fixée, un état donné. Quatrièmement, le module technique calcule, pour l'utilisation d'une technologie de restauration sur une période donnée, la concentration résiduelle en tout point d'échantillonnage sur le site. La concentration résiduelle est fonction de la concentration initiale et du taux d'enlèvement du contaminant, déterminés lors de l'évaluation de la performance de la technologie.

Le second module, le module économique, possède deux fonctions principales. La première utilise la concentration moyenne évaluée par le module technique, de même que l'étendue de la contamination pour concevoir les différents traitements possibles et, par la suite, pour en estimer les coûts d'utilisation. Les coûts d'utilisation sont calculés pour une période de temps fixée *a priori* et identique pour toutes les technologies (par exemple, une année utile de traitement). Ces coûts peuvent être répartis selon quatre étapes caractérisant le processus de restauration d'un site, à savoir : 1) l'installation du système de traitement, 2) l'opération et le suivi du traitement, 3) la fermeture du site et, 4) toutes autres activités associées à la technologie. Les coûts sont également séparés en deux catégories permettant de différencier les coûts fixes des coûts variables. Les coûts d'application d'une technologie sont fonction de la concentration moyenne en contaminants présents sur le site ainsi que de la conception retenue spécifique au site. La seconde fonction du module est d'évaluer les coûts nécessaires pour acquérir davantage d'informations sur le site. Il peut s'agir, par exemple, de nouveaux puits d'échantillonnage, de tests de minéralisation ou d'une caractérisation plus précise d'un paramètre déjà connu grossièrement. Une caractérisation supplémentaire étant dictée par le niveau de connaissance à propos du site, ces coûts sont fonction de l'état du site. Le détail de ces coûts et de leur évaluation est présenté au chapitre 4.

Le modèle a été développé en considérant trois alternatives pour un décideur dans son processus de choix technologique. La première est de choisir une technologie de restauration du site en

fonction des connaissances qu'il a du site et de sa contamination, selon un certain degré d'incertitude. La seconde est de modifier ses connaissances du site par une acquisition d'informations supplémentaires afin de choisir une technologie plus appropriée au site; l'acquisition d'information se faisant avant le choix technologique et révélant au décideur la véritable situation du site. Une version plus complexe du modèle permettrait d'acquérir une information dans le but de diminuer l'incertitude à propos de la situation du site, à un coût moins élevé qu'actuellement, mais sans pour autant connaître avec certitude la situation réelle. Finalement, la troisième alternative est de conserver le site dans son état actuel, soit initial ou après l'application d'une technologie en fin de période. Cette troisième alternative est associée à la sortie du modèle. L'alternative retenue pour le décideur est celle lui accordant la valeur espérée de restauration du site la plus élevée à cette période et prenant en considération les valeurs des périodes futures (la résolution du modèle se fait à rebours). L'outil d'aide à la gestion comporte une maximisation de ces trois alternatives.

L'évaluation des deux premières alternatives est conçue selon les mêmes principes généraux, à l'exception de l'acquisition d'informations pour ce qui est de la seconde alternative. Il a été souligné que le développement du modèle est inspiré d'un modèle simple d'analyse coûts-bénéfices. Les bénéfices, dans cette problématique de restauration d'un site contaminé, se résument à la valeur du site restauré ou non. Cette valeur dépend bien entendu de l'état du site. Un site contaminé aura une valeur marchande moindre que le même site non contaminé ou décontaminé. Par ailleurs, la valeur d'un site peut également dépendre de son utilisation future. Il est donc possible d'accroître les bénéfices d'une restauration en considérant non seulement la valeur marchande du site décontaminé mais également en y additionnant la valeur d'un projet qui y sera réalisé. Ce projet est aussi directement fonction de l'état du site. Par exemple, il est impossible de réaliser un projet d'habitation sur un site fortement contaminé. Cette valeur du site, le bénéfice de la restauration, est pondérée, d'une part, par la probabilité d'atteindre un état donné à partir d'une situation initiale et, d'autre part, par la probabilité d'occurrence de la situation initiale. Puisqu'il n'est pas possible de prédire avec certitude l'état du site après un traitement, la résultante de l'application d'une technologie sur le site sera un état parmi un ensemble d'états possibles. Ainsi, le modèle doit considérer les valeurs du site résultant de différents états et les probabilités de les atteindre à partir d'une situation initiale. La somme pondérée de ces valeurs de site donne la valeur espérée du site restauré par cette technologie à partir d'un état donné. Par cet ajout d'une probabilité conditionnelle sur l'atteinte d'un état du site, le modèle prend en considération l'efficacité d'une technologie de restauration.

Pour être un véritable outil de gestion des sites contaminés permettant de guider le choix de la technologie de restauration, le modèle doit non seulement indiquer au décideur quelle alternative est la plus avantageuse, mais il doit également permettre l'évaluation de diverses technologies de restauration et ainsi faire ressortir la technologie qui offre la plus grande valeur de restauration du site, c'est-à-dire la technologie la plus techniquement et économiquement avantageuse face aux objectifs de restauration du décideur. Pour ce faire, le modèle décrit précédemment est évalué pour chaque technologie possible et celle offrant la plus grande valeur est retenue.

La seconde alternative est développée de façon similaire à la première, à l'exception de l'ajout en début d'évaluation des coûts d'acquisition d'informations supplémentaires. Par cet accroissement des connaissances du décideur, on suppose que la situation réelle du site lui est révélée avant qu'il ait à choisir la technologie pour restaurer le site. Ceci à pour effet de sélectionner la technologie la plus appropriée pour chaque situation possible et non la technologie la plus appropriée pour toutes les situations possibles (pour un état donné).

Finalement, le modèle élaboré est récursif. Ceci permet de considérer qu'à la fin de l'application d'une technologie, le nouvel état obtenu peut servir de point de départ à une nouvelle application du modèle pour une période supplémentaire. De la sorte, il est possible de diminuer la

contamination sur le site par l'application prolongée de la technologie déjà retenue ou par le recours à une nouvelle technologie. Ainsi, le modèle ne suggère pas uniquement une technologie au décideur, mais une séquence de technologies pouvant comprendre une acquisition progressive d'informations supplémentaires entre chaque période de traitement.

Une restriction s'impose tout de même dans le modèle pour une utilisation successive de plusieurs technologies. L'ensemble des technologies disponibles doit prendre en considération les technologies qui ont été utilisées précédemment. Par exemple, il n'est pas possible d'utiliser une technologie de restauration *in situ* si le sol a été préalablement excavé. C'est pourquoi, les technologies considérées dans le modèle sont divisées en deux catégories : les technologies réversibles, soit celles qui ne modifient pas la nature du site et qui n'engendrent pas de modification irréversible du site, et les technologies irréversibles. L'utilisation d'une technologie irréversible lors d'une période de la restauration élimine ainsi les technologies réversibles de l'ensemble des technologies disponibles. Par contre, l'utilisation d'une technologie de restauration réversible, en ne diminuant pas l'ensemble des technologies disponibles pour les choix futurs, permet de conserver plusieurs options pour les décisions à venir.

Weisbrod (1964) a défini la valeur d'option comme étant une addition au surplus du consommateur en milieu d'incertitude sur la demande pour un bien ou un service. Arrow et Fisher (1974) ont introduit par la suite la notion de quasi-valeur d'option comme étant le gain réalisé en reportant une action ou décision irréversible, lorsqu'il y a incertitude sur la situation du milieu, afin d'améliorer les connaissances sur cette situation et de faire un choix plus judicieux. La prise en considération de la valeur d'option dans un processus de décision fait intervenir à la fois la notion d'irréversibilité d'une action et le potentiel de retarder cette dernière (Dixit and Pindyck 1994). Le modèle développé ici pour la gestion des sites contaminés s'inscrit tout à fait dans cette théorie de valeur d'option. Le retard dans le processus de décision est abordé dans la seconde alternative. Le principe d'irréversibilité dans une décision, pour sa part, doit être considéré sous deux volets dans ce modèle. Le premier est le degré de réversibilité d'une technologie par rapport à une autre, notion permettant de restreindre plus ou moins l'ensemble des technologies disponibles d'une période à une autre. Le second volet est associé à la notion d'irréversibilité économique, notion à la base de la valeur d'option. Une décision est économiquement irréversible s'il est impossible d'en récupérer son investissement lors de l'annulation de la décision. Dans le cas de la restauration d'un site, peu importe la technologie utilisée, l'arrêt de l'utilisation de cette dernière et son démantèlement, avant l'atteinte des objectifs de restauration, ne permettent pas de récupérer l'investissement. Toute technologie de restauration est considérée comme économiquement irréversible, et certaines sont techniquement irréversibles.

Dans le modèle, la différence entre la première alternative et la seconde repose sur le pouvoir d'acquérir de l'information sur la véritable situation du site afin d'en diminuer l'incertitude et de pouvoir choisir la technologie appropriée. Ceci permet d'éviter le risque d'opter pour une technologie non adéquate et ne permettant pas de retour sur la décision par la suite. Par contre, la notion de valeur d'option, telle qu'elle fût introduite ici, est considérée dans ce modèle comme la *valeur d'option théorique*. Ceci a pour but de marquer la différence fondamentale qui existe entre la gratuité de l'acquisition d'information en économie, dans le domaine des marchés boursiers par exemple, où tous peuvent avoir accès gratuitement à l'état du marché, comparativement à l'acquisition d'information coûteuse en restauration des sites. La valeur d'option en restauration des sites, soit le gain réalisé de retarder la sélection d'une technologie afin de réduire l'incertitude sur l'état du site, est moindre que la valeur d'option théorique. Ceci se remarque dans le modèle développé par l'ajout dans la seconde alternative d'un terme négatif, représentant les coûts d'acquisition d'information. Si en économie, dans un contexte d'incertitude, le report d'une action irréversible est bénéfique, en restauration des sites, il peut ne pas en être de même, en

raison des coûts d'acquisition d'information supérieurs (en valeur absolue) à la valeur d'option théorique. Le modèle technico-économique est présenté à l'Équation 1.

$$V_n(q) = \max \begin{cases} \max\limits_{t \in T(q)} \left(\sum\limits_{s \in S} q(s) \cdot \left[-C(s,t) + \alpha \cdot \int\limits_{q' \in Q(s)} P(q' | s,t) \cdot V_{n-1}(q') dq' \right] \right) \\ -I(q) + \sum\limits_{s \in S} q(s) \cdot \max\limits_{t \in T(s)} \left[-C(s,t) + \alpha \cdot \int\limits_{q' \in Q(s)} P(q' | s,t) \cdot V_{n-1}(q') dq' \right] \\ R(q) \end{cases}$$

$$\text{avec } V_0(q) = R(q)$$

Équation 1- Modèle technico-économique

Avant d'entreprendre des simulations avec le modèle METEORS, le chapitre suivant présente l'enveloppe du modèle, la structure de décision de l'outil. Les différentes composantes servant d'entrants et de sortants au modèle sont exposées afin de comprendre en détail le processus de décision de l'outil et les formes de réponses auxquelles un décideur peut s'attendre.

2 Schématisation de la structure de décision de l'outil

Tel qu'il a été détaillé dans la présentation du modèle à la section précédente, plusieurs étapes entrent dans une structure relativement complexe du processus d'aide à la gestion intégré par le modèle. En considérant l'introduction future d'un ensemble considérable de technologies, ces étapes ont pu être définies de façon plus précise et intégrées de manière conceptuelle afin d'en faciliter l'interprétation et la compréhension. Ceci a également permis d'ajuster la structure décisionnelle afin d'en faciliter l'éventuelle intégration à un système informatique interactif.

La Figure 1 illustre de façon schématique la structure de décision de l'outil et le cheminement requis afin d'en arriver à une stratégie de gestion optimale. Les trois alternatives évaluées par le modèle, au début de la simulation, puis après chaque période de traitement, sont représentées, soit l'utilisation d'une technologie de restauration, l'acquisition d'information supplémentaire pour augmenter le niveau de certitude concernant l'état du site, et le statu quo qui termine la simulation.

La première partie du modèle consiste en la création des multiples scénarios possibles, à chaque période de traitement, à partir de l'état du site (données techniques sur le site et sur la contamination), des technologies applicables, du design optimal des systèmes de traitement pour chacune des technologies applicables, des coûts d'application de ces systèmes et enfin, de leur efficacité à abaisser le niveau de contamination.

La seconde partie consiste en l'évaluation de la valeur des scénarios et de la stratégie optimale de restauration du site. La valeur est établie à rebours, en ajoutant la valeur pondérée de chaque période future à la valeur de la période évaluée. La valeur de la dernière période, la première à être évaluée, est établie selon la valeur marchande du site ou la réalisation d'un projet et l'état du site en fin de restauration. Cette régression dans l'arbre de décisions (ou de scénarios possibles), de la fin de la dernière période jusqu'au début de la simulation, permet au modèle de retenir une série d'actions avantageuses et d'établir ainsi la stratégie de gestion optimale.

À titre d'exemple et pour démontrer de façon plus concrète le fonctionnement de l'outil, sous forme d'un éventuel logiciel intégrant le modèle technino-économique, considérons un site contaminé donné, avec des caractéristiques précises, selon la nature du site et de la contamination, et plus ou moins bien connues selon la qualité de l'information disponible au moment de la prise de décision.

Première partie

MODULE TECHNIQUE

1. **Entrée des données de caractérisation**
   - L'utilisateur cible la zone à l'étude en fonction des données de caractérisation;
   - l'utilisateur entre dans le modèle les caractéristiques de la zone avec le degré de certitude pour chacun des paramètres (nature du sol, profondeur de la nappe, degré de contamination, etc.), et ce, pour chacun des points d'échantillonnage (de façon similaire aux logiciels SITE I et II);

2. **Détermination de l'état du site**
   - Le logiciel, par simulation géostatistique, définit l'état du site (ou de la zone ciblée) et la concentration moyenne d'un contaminant type, ou d'un ensemble de contaminants;

3. **Détermination des technologies applicables**

- Le logiciel consulte les facteurs d'applicabilité dans la base de données technologiques;
- le logiciel compare les conditions du site et ces facteurs pour ensuite faire l'évaluation de l'applicabilité des technologies de restauration. De façon évidente, certaines technologies jugées inapplicables seront rejetées immédiatement, tel le biobarbottage en zone vadose, par exemple, ou encore la bioventilation dans un sol de très faible perméabilité. D'autres seront retenues et un facteur de pondération sur l'applicabilité leur sera accordé selon le degré de compatibilité entre les données du site et les facteurs d'applicabilité des technologies.

4. **Design des systèmes de restauration pour chaque technologie**

- Le logiciel procède à la conception d'un système de restauration pour chacune des technologies retenues à l'aide des bases de données technologiques contenant une liste exhaustive des composantes requises dans la conception de systèmes de restauration. Le choix, les dimensions et les spécifications des composantes à utiliser sont déterminés en fonction de l'étendue de la zone à restaurer et des caractéristiques du site. Dans le cas où l'information disponible ne serait pas suffisante pour concevoir adéquatement un système de restauration en particulier, le degré d'incertitude face à l'efficacité de la technologie sera plus élevé et une valeur par défaut du paramètre manquant pourra être utilisée;
- en parallèle, le logiciel procède à la conception d'un programme de caractérisation supplémentaire (nombre de forages, d'échantillons, d'analyses chimiques, etc.).

MODULE ÉCONOMIQUE

1. **Estimation des coûts d'utilisation annuels de la technologie**

- Pour chaque système de restauration, le logiciel évalue les coûts d'utilisation annuels, soient :
    - l'installation du système de traitement,
    - l'opération et le suivi du traitement,
    - la fermeture du site,
    - toute autre activité associée à la technologie.

- En parallèle, selon l'état du site et les données déjà disponibles, le logiciel évalue les coûts d'une caractérisation supplémentaire afin d'augmenter le degré de certitude concernant l'état du site.
- Pour chaque technologie applicable et pour chaque situation ou état du site défini antérieurement, le logiciel simule, sur une période de temps déterminée par l'utilisateur, l'utilisation du système de restauration conçu. Le logiciel génère ensuite une série de scénarios, chacun ayant une probabilité d'occurrence, un coût associé et un nouvel état pour le site.

L'utilisateur retrouve alors les trois alternatives initiales suivantes :

- poursuivre la simulation en appliquant une technologie de restauration avec un niveau de certitude de l'état du site plus ou moins élevé;
- passer à une étape de caractérisation supplémentaire pour augmenter le niveau de certitude;
- terminer la simulation pour différentes raison, tels que des objectifs de réhabilitation rencontrés de façon satisfaisante, ou encore un échéancier de projet ne permettant pas plus qu'une seule période de traitement, par exemple.

Deuxième partie

MODULE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

- À la fin de la première partie, suite à une ou plusieurs périodes de temps, l'arbre décisionnel comprenant la série de scénarios potentiels établie est complété et le logiciel peut alors calculer la valeur marchande du site pour chaque état résultant de la dernière période de simulation.
- À partir de ces valeurs, le logiciel « remonte » successivement l'arbre par le chemin où la valeur du site est la plus élevée et attribue ainsi à chaque période la valeur pondérée des périodes futures et ainsi de suite jusqu'à l'état initial.
- La stratégie optimale de restauration est établie à partir de l'ensemble des décisions (choix de technologies et d'alternatives, soit avec ou sans acquisition d'information supplémentaire).
- La stratégie optimale de restauration est composée d'une série de scénarios correspondants à ces décisions.

Figure 1- Schématisation de la structure décisionnelle de l'outil de gestion

(à insérer en format 11x17 à partir du fichier jpeg ou Corel)

MODÈLE TECHNIQUE
Étapes
1 + 2
Temps 0
conditions initiales
DONNÉES DE CARACTÉRISATION
GÉOLOGIE, HYDROGÉOLOGIE, MICROBIOLOGIE, DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES CONTAMINATION
SITE
q
(état du site)
% de probabilités d'occurence d'une situation de contamination (plages A, B, C)
Acquisition d'informations supplémentaires

STRATÉGIE DE GESTION
- TEMPS MOYEN DE RESTAURATION
- ÉTAT et VALEUR ESPÉRÉE DU SITE À LA FIN DE LA PÉRIODE
- BESOIN D'INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE OU NON
- SCÉNARIOS APPLICABLES (probabilités d'occurence, valeurs et temps réels)
- VALEUR ESPÉRÉE DE LA STRATÉGIE

SIMULATION TECHNICO-ÉCONOMIQUE

MODÈLE TECHNIQUE
Étape
3
Technologies de restauration (t)
t 1
t 2
t 3
t 4
t 5
BASE DE DONNÉES
Facteurs d'applicabilité
Pondération
Technologies pondérées

MODÈLE TECHNIQUE Étape 4 + MODÈLE ÉCONOMIQUE Étape 1
BASES DE DONNÉES
- Éléments de design
- Coûts (C)
- Performance(Pe)
Design Caractérisation suppl. C
Design t2 C Pe
Design t4 C Pe
Design t5 C Pe
Fin de la simulation

SCÉNARIOS POSSIBLES (Sc) et probabilités d'occurence
Scn %
Sc1 %
Sc2 %

Après 1 an*
* ou selon une période de temps définie par l'utilisateur
Sc1 % d'occurence Coûts de traitement C1 Nouvel État du site q1'
Sc2 % d'occurence Coûts de traitement C2 Nouvel État du site q2'
Scn % d'occurence Coûts de traitement Cn Nouvel État du site qn'

Après 2 ans*
si nécessaire
Contraintes liées à l'utilisation de la technologie précédente

Processus régressif pour l'évaluation de la suite de scénarios offrant la valeur marchande la plus grande, compte tenu des coûts de restauration

Dernière année de traitement et/ou fin de la simulation

R: Valeur marchande du terrain pour chaque scénario (selon l'état du site projeté)
R1 R2 ... Rn

FIGURE 1. SCHÉMATISATION DE LA STRUCTURE DÉCISIONNELLE DE L'OUTIL DE GESTION

3 Technologies considérées

Dans le cadre du présent mandat, un certain nombre de technologies de restauration ont été retenues pour l'élaboration des bases de données qui seront éventuellement intégrées au modèle. Dans une étape ultérieure de création du logiciel SITE VII, d'autres technologies viendront s'ajouter de façon à accroître le nombre de scénarios à être évalué par l'outil de gestion. Avec un plus grand nombre de technologies pouvant être intégrées, la création et la comparaison des différents scénarios seront plus réalistes permettant ainsi d'obtenir une stratégie de restauration mieux adaptée et considérant un maximum d'approches possibles. Ainsi, les technologies ayant été retenues pour la présente phase sont : deux technologies *ex situ*, considérées comme techniquement irréversibles (c'est à dire modifiant de façon permanente la nature du site par l'excavation qu'elles requièrent) par le modèle ainsi que trois technologies *in situ*, considérées comme techniquement réversibles (c'est à dire ne modifiant par la nature du site), soit :

- la bioventilation *in situ (*Annexe 1);
- le traitement *ex situ* en biopiles (Annexe 2);
- la bioaspiration (Annexe 3);
- le biobarbotage *in situ* (Annexe 4) et,
- la désorption thermique *ex situ* (Annexe 5).

Une synthèse de chaque technologie est fournie en annexe et présente un aperçu des principes, des conditions d'applications, des performances ainsi que des coûts généraux associés. Pour chaque technologie, une liste de références bibliographiques est également présentée. Une liste exhaustive des composantes de chaque technologie avec un coût unitaire pour chacune de ces composantes est fournie et constitue la base de données qui sera utilisée par le logiciel pour établir le design et les coûts totaux de la technologie.

Le Tableau 1 montre un exemple de facteurs d'applicabilité pour les trois technologies *in situ* présentées jusqu'ici.

Les coûts totaux associés à une technologie en particulier varient selon la conception de la technologie, qui dépend elle-même grandement des caractéristiques du site à l'étude (étendue, nature, contamination, etc.), des contraintes reliées à l'application de la technologie sur le terrain et également des contraintes reliées au projet de restauration. À ce stade-ci, seules la bioventilation *in situ* et la biopile ont fait l'objet d'un calcul de coûts totaux suite à une conception spécifique au site. Ces conceptions ont été réalisées dans le cadre des simulations présentées au chapitre 5. Les autres bases de données ne contiennent que les coûts unitaires.

Tableau 1. Facteurs d'applicabilité des technologies présentées

Paramètres	Bioaspiration		Biobarbotage		Bioventilation	
Perméabilité intrinsèque (k)	> 0,01 darcy (> 10^{-10} cm^2)		> 0,1 darcy (> 10^{-9} cm^2)		> 1 darcy (> 10^{-8} cm^2)	
	0,001 à 0,01 darcy (10^{-11} à 10^{-10} cm^2)		0,01 à 0,1 darcy (10^{-10} à 10^{-9} cm^2)		0,1 à 1 darcy (10^{-9} à 10^{-8} cm^2)	
	0,0001 à 0,001 darcy (10^{-12} à 10^{-11} cm^2)		0,001 à 0,01 darcy (10^{-11} à 10^{-10} cm^2)		0,01 à 0,1 darcy (10^{-10} à 10^{-8} cm^2)	
	< 0,0001 darcy (< 10^{-12} cm^2)	x	**< 0,001 darcy (< 10^{-11} cm^2)**	x	**< 0,01 darcy (< 10^{-10} cm^2)**	x
Structure et stratification du sol	Composition uniforme de sable ou gravier		Composition uniforme de sable ou gravier		Composition uniforme de sable ou gravier	
	Composition uniforme de till sableux ou tourbe		Composition uniforme de till sableux ou tourbe		Composition uniforme de till sableux ou tourbe	
	Composition uniforme de silt		Composition uniforme de silt		Composition uniforme de silt	
	Remblai perméable		Remblai perméable		Remblai perméable	
	Till sableux av. lentilles imperméables (argile)		Till sableux av. lentilles imperméables (argile)		Till sableux av. lentilles imperméables (argile)	
	Remblai imperméable		Remblai imperméable		Remblai imperméable	
	Argile très fracturée		Argile très fracturée		Argile très fracturée	
	Roc métamorphique ou igné fracturé		Roc métamorphique ou igné fracturé		Roc métamorphique ou igné fracturé	
	Argile peu fracturée		Argile peu fracturée		Argile peu fracturée	
	Roc		Roc		Roc	
pH du sol	6,8 à 7,2		6,8 à 7,2		6,8 à 7,2	
	6 à 6,8 ou 7,2 à 8		6 à 6,8 ou 7,2 à 8		6 à 6,8 ou 7,2 à 8	
	5 à 6 ou 8 à 9		5 à 6 ou 8 à 9		5 à 6 ou 8 à 9	
	1 à 5 ou 9 à 14	x	**1 à 5 ou 9 à 14**	x	**1 à 5 ou 9 à 14**	x
Teneur en humidité du sol	5 à 15 % massique		5 à 15 % massique		5 à 15 % massique	
	15 à 25 % massique		15 à 25 % massique		15 à 25 % massique	
	2 à 5 % massique		2 à 5 % massique		2 à 5 % massique	
	< 2 % ou > 25 % massique	x	**< 2 % ou > 25 % massique**	x	**< 2 % ou > 25 % massique**	x
Température du sol	20 à 40 °C		20 à 40 °C		20 à 40 °C	
	10 à 20 °C		10 à 20 °C		10 à 20 °C	
	5 à 10 ou 40 à 45°C		5 à 10 ou 40 à 45°C		5 à 10 °C	
	< 5 °C ou > 45 °C	x	**< 5** °C ou > 45 °C	x	**< 5** °C ou > 40 °C	x
Profondeur de la nappe phréatique	> 3,00 mètres		> 3,00 mètres		> 3,00 mètres	
	2,00 à 3,00 mètres		2,00 à 3,00 mètres		2,00 à 3,00 mètres	
	1,00 à 2,00 mètres		1,00 à 2,00 mètres		1,00 à 2,00 mètres	
	< 1,00 mètre	x	**< 1,00 mètre**	x	**< 1,00 mètre**	x
Concentration en fer dissout dans l'eau souterraine	n.a.		< 10 mg/L		n.a.	
	n.a.		10 à 20 mg/L		n.a.	
	n.a.		**> 20 mg/L**	x	n.a.	
Caractéristique du contaminant : phase mobile?	Oui		**Oui**	x	Oui	
	non	x	non		non	
Caractéristique du contaminant : tension de vapeur	< 1 mm Hg		< 1 mm Hg (0,133 kPa)		< 1 mm Hg	
	1 à 760 mm Hg		1 à 760 mm Hg (0,133 à 101,3 kPa)		1 à 760 mm Hg	
	> 760 mm Hg	x	**> 760 mm Hg (>101,3 kPa)**	x	**> 760 mm Hg**	x
Caractéristique du contaminant : Point d'ébullition	>350 °C		>350 °C		>350 °C	
	300 à 350 °C		300 à 350 °C		300 à 350 °C	
	200 à 300°C		200 à 300°C		200 à 300°C	
	< 200 °C	x	**< 200** °C	x	**< 200** °C	x
Caractéristique du contaminant : Constante de Henry	> 200 atm (20265 bar)		> 200 atm (20265 bar)		> 200 atm (20265 bar)	
	100 à 200 atm (10135 à 20265 kPa)		100 à 200 atm (10135 à 20265 kPa)		100 à 200 atm (10135 à 20265 kPa)	
	50 à 100 atm (5066 à 10135 kPa)		50 à 100 atm (5066 à 10135 kPa)		50 à 100 atm (5066 à 10135 kPa)	
	20 à 50 atm (2026 à 10135 kPa)		20 à 50 atm (2026 à 10135 kPa)		20 à 50 atm (2026 à 10135 kPa)	
	< 20 atm (< 2026 kPa)	x	**< 20 atm (< 2026 kPa)**	x	**< 20 atm (< 2026 kPa)**	
Concentration et toxicité du contaminant (pour les hydrocarbures totaux)	>25 000 mg/kg		< 5 000 mg/kg		< 1 000 mg/kg	
	1 000 à 5 000 mg/kg		5 000 à 10 000 mg/kg		1 000 à 5 000 mg/kg	
	5 000 à 10 000 mg/kg		10 000 à 25 000 mg/kg		5 000 à 10 000 mg/kg	
	10 000 à 25 000 mg/kg		25 000 à 50 000 mg/kg		10 000 à 25 000 mg/kg	
	>25 000 mg/kg	x	**>50 000 mg/kg**	x	**>25 000 mg/kg**	x
Concentration et toxicité du contaminant (pour les métaux lourds)	< 100 mg/kg		< 100 mg/kg		< 100 mg/kg	
	100 à 500 mg/kg		100 à 500 mg/kg		100 à 500 mg/kg	
	500 à 1000 mg/kg		500 à 1000 mg/kg		500 à 1000 mg/kg	
	1000 à 2500 mg/kg		1000 à 2500 mg/kg		1000 à 2500 mg/kg	
	> 2500 mg/kg	x	**> 2500 mg/kg**	x	**> 2500 mg/kg**	x

Paramètres	Désorption thermique	
Type de sol (granulométrie et plasticité)	Présence de cailloux ou de blocs	
	Sable ou gravier	
	Silt	
	Silt argileux	
	Argile	x
Teneur en humidité du sol	10 à 25% massique	
	5 à 10% ou 25 à 30% massique	
	< 5 % ou > 30 % massique	x
Concentration en matière humique	Forte	
	Moyenne	
	Faible	
	Nulle	
Concentration en métaux	Forte	
	Moyenne	
	Faible	
	Nulle	
Structure chimique du contaminant (tension de vapeur)	< 1 mm Hg	
	1 à 760 mm Hg	
	> 760 mm Hg	x
Concentration et toxicité du contaminant (pour les hydrocarbures totaux)	< 1 000 mg/kg	
	1 000 à 5 000 mg/kg	
	5 000 à 10 000 mg/kg	
	10 000 à 25 000 mg/kg	
	>25 000 mg/kg	x
Point d'ébullition	> 350°C	
	200 à 350°C	
	100 à 200°C	
	< 100°C	x
Kow	Élevé	
	Moyen	
	Faible	
Solubilité (ou poids moléculaire)	Élevée	
	Moyenne	
	Faible	x
Stabilité thermique	Point éclair élevé	
	Point éclair moyen	
	Point éclair faible	x
Possibilité de formation des dioxines	Présence de BPC ou autres produits chlorés	
	Absence de BPC ou autres produits chlorés	
Excavation des sols	Très facile (profondeur < 5 m, accessible)	
	Facile (profondeur entre 5 et 10m, accessible)	
	Difficile (profondeur >10m, accessible)	
	Impraticable (trop profond ou présence d'infrastructure)	x

x : rejet de la technologie

4 Création des bases de données économiques

Afin d'évaluer avec le plus de justesse possible les coûts de traitement des scénarios développés lors des simulations de restauration, une structure de traitement des données économiques a été mise en place. La présente section présente et justifie les particularités de cette structure. Les bases de données économiques développées suite à la mise en place de cette structure sont présentées dans les Annexe 1 à Annexe 6.

Les entrants économiques du modèle METEORS se divisent en deux groupes : 1) les coûts associés au traitement d'un site par une technologie donnée et pour un niveau de contamination donnée (situation) et, 2) les coûts associés à l'acquisition d'information supplémentaire permettant de diminuer l'incertitude sur de l'état du site, voire obtenir avec certitude la véritable situation du site. Cette section est divisée de façon à présenter la structure de traitement des données économiques selon ces deux groupes.

4.1 Coûts associés au traitement du site

La grande difficulté qui prévaut actuellement dans le traitement des données économiques associées à la restauration d'un site n'est pas d'obtenir les données mais plutôt de les obtenir sous une forme standard, reflétant les caractéristiques particulières au site traité et la technologie utilisée, mais permettant également d'être utilisées, à titre comparatif ou de première analyse, pour une autre restauration. La Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), qui propose déjà des matrices de sélection de différentes technologies selon des critères techniques (chimiques, physiques, biologiques, géologiques et hydrogéologiques), a publié, en 1998, un guide servant à mettre en place une base des données économiques de restauration des sites contaminés. Afin d'uniformiser les données provenant de plusieurs sources, la FRTR suggère une division en quatre catégories des coûts de restauration : 1) coûts fixes, 2) coûts d'opération et de maintenance (communément appelés « coûts variables »), 3) autres coûts spécifiques à une technologie donnée et, 4) autres coûts associés au projet (Federal Remediation Technologies Roundtable and others, 1998). DuTeaux (1996) divise les coûts de restauration d'un site en deux catégories, soit les coûts fixes et les coûts variables.

Le modèle METEORS est basé sur une utilisation séquentielle de différentes technologies, technologies. Ce peut être une même technologie durant un certain nombre de périodes et ensuite faisant place à une autre technologie, par exemple. Cette séquence de technologies introduit deux des quatre catégories présentées précédemment, à savoir les coûts fixes et les coûts variables. Lors de la première utilisation d'une technologie sur un site, l'installation de cette dernière nécessite des frais non récurrents (coûts fixes) mais pouvant être importants comparativement aux frais récurrents (coûts variables). Lors de cette première utilisation, les coûts variables sont également pris en considération puisque, sauf indication contraire, le traitement débute la même année que l'installation de la technologie. Ainsi, lors de la première utilisation d'une technologie, les coûts fixes et les coûts variables forment les coûts totaux de traitement. Par contre, les années ou périodes suivantes d'utilisation de la même technologie, seuls les coûts variables forment les coûts totaux de traitement. Si, entre deux périodes, un changement de technologie est nécessaire, les coûts fixes de la nouvelle technologie seront de nouveau considérés lors de cette première année de traitement avec cette dernière technologie. Les deux dernières catégories de coûts établies par la FRTR ne sont pas prises en considération à cette étape du développement de la structure de traitement des données économiques car il est jugé que les coûts associés à ces catégories peuvent être inclus sans problème majeur dans les deux premières catégories. Les deux catégories de coûts retenus forment le premier groupe d'entrants économiques du modèle METEORS selon que la technologie considérée est utilisée pour la première fois (coûts fixes et coûts variables) ou les fois suivantes (coûts variables) sur le site.

Maintenant que sont définis les éléments entrant dans le premier groupe d'entrants économiques, il faut établir une méthode d'évaluation de ces coûts, méthode qui doit prendre en considération le plus possible d'éléments influençant ces coûts. Pour ce faire, le processus de restauration a été divisé en quatre étapes distinctes se retrouvant dans l'ensemble des technologies de restauration mais selon différents niveaux d'importance. Ces étapes sont : 1) l'installation du système de traitement, 2) l'opération et le suivi du traitement, 3) la fermeture du site et, 4) toute autre activité associée à la technologie. Le Tableau 2 présente quelques exemples d'activités pour certaines technologies et les étapes auxquelles ils appartiennent.

Tableau 2- Exemples d'activités associées aux différentes étapes du processus de restauration

Activités	Technologies	Étapes
Excavation du sol à traiter	Technologies *ex situ*	1) installation du système de traitement
Transport du sol à traiter	Technologies *ex situ* non réalisées sur le site même	1) installation du système de traitement
Forage des puits de ventilation	Bioventilation *in situ* ou extraction de vapeur	1) installation du système de traitement
Installation d'un système de ventilation	Bioventilation *in situ* ou extraction de vapeur	1) installation du système de traitement
Transport sur le site d'un incinérateur mobile	Traitement thermique	1) installation du système de traitement
Brassage des sols	Traitement en biopile	2) Opération et suivi du traitement
Échantillonnage des sols	La majorité des technologies	2) Opération et suivi du traitement
Ajustement de la teneur en humidité du sol	Traitement en biopile	2) Opération et suivi du traitement
Remblayage du sol	Technologies *ex situ*	3) Fermeture du site
Analyse du sol pour les certificats de restauration	La majorité des technologies	3) Fermeture du site
Démantèlement des équipements	La majorité des technologies	3) Fermeture du site
Décontamination des équipements	La majorité des technologies	4) Autres activités
Besoins en énergie	La majorité des technologies	4) Autres activités

À l'intérieur de chacune de ces étapes, les activités elles-mêmes peuvent être subdivisées en trois sous-groupes réunissant les différents éléments entrant dans la réalisation de l'activité. Ces sous-groupes sont : 1) le matériel, 2) la main-d'œuvre requise et, 3) les équipements nécessaires pour la mise en place du matériel. Il faut noter ici la différence importante entre matériel et équipement. Le premier est ce qui est mis en place dans le but de réaliser l'activité, tandis que le second est utilisé pour effectuer cette mise en place. Par exemple, dans le cas d'une installation d'un puits de ventilation en bioventilation *in situ*, le tuyau de PVC, la crépine, le bouchon de fond de puits, le sable, le ciment, les joints de bentonite et le couvercle constituent du matériel mis en place pour la réalisation du puits. Par contre, la foreuse manuelle ou mécanique est un équipement nécessaire à la mise en place du puits lui-même. La Figure 2 présente l'ensemble de la structure de traitement des données économiques. Il est à remarquer sur cette figure que les coûts fixes et les coûts variables ne s'additionnent pour former les coûts totaux que si la technologie en est à sa première période d'utilisation.

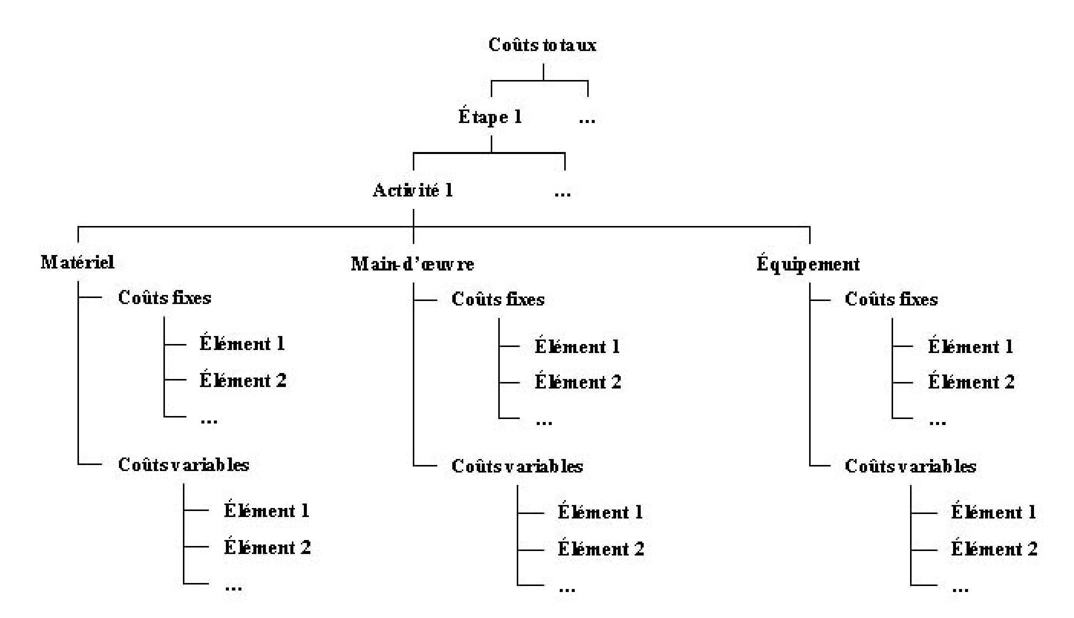


Figure 2- Structure de traitement des données économiques

Une telle structure est développée pour chaque technologie. Parallèlement à ces structures, des bases de coûts unitaires sont mises en place pour chaque groupe d'éléments; par exemple, le forage, l'excavation, les analyses et les ressources humaines. À l'intérieur de ces groupes, tous les éléments possibles y sont répertoriés, de même que leurs coûts unitaires totaux et ceux divisés selon les trois sous-groupes : matériel, main-d'œuvre et équipement.

Lors de l'évaluation des coûts de traitement d'une technologie en particulier, sa structure de traitement des données économiques est mise en relation avec les bases de données de coûts unitaires et le dimensionnement de la technologie pour créer une base de données économiques temporaire pour cette technologie. L'avantage de ces bases de coûts unitaires générales à toutes les technologies réside dans la facilité de modification des coûts de traitement de toutes les technologies. Pour ce faire, il suffit de modifier la valeur unitaire d'un élément dans la base unitaire correspondante pour que toute base temporaire créée par la suite prenne cette modification en considération.

Les Annexe 1à Annexe 6contiennent les bases de coûts unitaires développées jusqu'à présent. Des exemples de base de données économiques temporaires sont présentées à la suite des fiches techniques de la bioventilation *in situ* et de la biopile. Ces bases sont utilisées dans les différentes simulations de ce projet.

4.2 Coûts associés à l'acquisition d'informations supplémentaires

Le second groupe d'entrants économiques dans le modèle METEORS rassemble les coûts associés à l'acquisition d'informations supplémentaires permettant de diminuer l'incertitude face au réel niveau de contamination du site. Tel que développé, le modèle consent cette acquisition d'informations avant de choisir la technologie à utiliser, permettant ainsi une sélection plus juste de l'action de restauration, une plus grande certitude d'atteindre les objectifs de restauration et donc une plus grande valeur pour la stratégie. Dans un contexte de restauration des sites contaminés, dans lequel l'incertitude sur le niveau de contamination d'un site est important, ce genre d'acquisition d'informations passe nécessairement par une étape de caractérisation supplémentaire et donc, entraîne une augmentation des coûts associés au traitement. La recherche sur le sujet en restauration des sites permet d'affirmer que contrairement à la notion de valeur d'option qui est profitable dans le domaine économique, la quantité d'informations

nécessaires est souvent trop importante et trop coûteuse, pouvant entraîner une valeur d'option négative (Forsyth 1997 et Bage et al., Soumis 2001-b). Dans de pareils cas, la prise de décision en milieu d'incertitude sur le niveau de contamination est avantageuse comparativement à celle en milieu de certitude.

Afin de déterminer les coûts associés à cette acquisition d'informations, deux hypothèses sont faites, à savoir que : 1) l'acquisition d'informations permet de savoir avec certitude la véritable situation du site et, 2) la caractérisation permettant d'obtenir l'information est réalisée sur le site par un échantillonnage de sol et des analyses chimiques en laboratoire. En s'appuyant sur ces deux hypothèses, il a été déterminé que le paramètre affectant directement les coûts d'acquisition d'informations était le nombre d'échantillons nécessaire pour obtenir une certitude concernant la situation du site.

Une méthodologie a été développée pour évaluer ce nombre d'échantillons. Cette dernière est basée sur des approches déjà publiées dans le domaine de la restauration des sites ainsi que sur les paramètres disponibles dans la simulation. L'objectif est d'établir le nombre d'échantillons minimum nécessaire afin de s'assurer que la moyenne des concentrations sur le site est supérieure à une concentration donnée. Il est proposé dans U.S. Environmental Protection Agency (1995) d'utiliser une approche développée par Ott (1984) pour établir la quantité d'échantillons nécessaire afin d'observer une différence statistique entre une concentration initiale et une concentration finale. Plus les deux concentrations sont similaires, plus le nombre d'échantillons pour les démarquer sera important. En remplaçant une des deux concentrations par une valeur préétablie, une concentration limite, il est possible d'évaluer le nombre d'échantillons nécessaire afin d'assurer une différence significative entre la concentration du site et cette limite. L'intérêt de cette approche est l'utilisation combinée des deux types d'erreurs statistiques, soit l'erreur de type I (faux négatif) et l'erreur de type II (faux positif). Ces types d'erreurs considèrent respectivement la probabilité de rejeter une situation désirable et celle d'accepter une situation indésirable. En fixant les deux probabilités maximales que peut accepter un décideur, et en connaissant également les concentrations initiale et finale (ou limite) ainsi que la variance de la concentration initiale, il est possible d'obtenir le nombre d'échantillons minimum nécessaire. L'Équation 2 résume cette approche, où Z_α est la probabilité d'une erreur de type I, Z_β est la probabilité d'une erreur de type II, σ est l'écart-type de la concentration moyenne, $C_{moyenne}$ et C_{limite} sont respectivement la concentration moyenne connue et la concentration limite fixée.

$$n = \frac{\left(Z_\alpha + Z_\beta\right)^2 \sigma^2}{\left(C_{limite} - C_{moyenne}\right)^2}$$

Équation 2- Nombre minimum d'échantillons nécessaire pour connaître la situation d'un site avec certitude

Cette équation est basée sur un test d'hypothèse sur la moyenne avec connaissance de la variance. L'hypothèse nulle (H_0) est que la concentration du site est inférieure ou égale à la limite fixée. L'hypothèse alternative (H_1) est donc que la concentration du site est supérieure à la limite fixée. Le nombre d'échantillons obtenu par l'Équation 2 permet d'accepter l'hypothèse nulle avec un risque équivalent à β de faire une erreur de type II, soit d'accepter que l'hypothèse nulle soit vraie alors qu'elle est fausse. Ainsi, avec une acquisition d'informations supplémentaires basée sur le nombre d'échantillons obtenu précédemment, le décideur a l'assurance que la concentration est supérieure ou égale à la limite fixée avec une probabilité équivalente au complément de la probabilité de type II.

Les probabilités d'erreur de type I et II (α et β) ont été toutes deux fixées à 10% bien que pour respecter la première des deux hypothèses évoquées au début de cette section, les probabilités

doivent être de 0% puisque l'acquisition d'informations enlève toute incertitude sur la situation du site. Par contre, ceci génèrerait des quantités d'échantillons beaucoup trop importantes, voire infinies. Si l'une des deux probabilités devait être ajustée, la priorité serait mise sur la probabilité de type II. En effet, dans le contexte de restauration des sites, identifier qu'un site est contaminé alors qu'il ne l'est plus en réalité n'entraîne que des conséquences économiques (sans pour autant les minimiser), alors qu'identifier un site non contaminé alors qu'il l'est encore peut entraîner des risques pour l'environnement et pour la santé humaine. Ainsi, afin de se rapprocher de l'hypothèse de certitude, la probabilité de type II pourrait être réduite, bien qu'elle reste fixée à 10% pour les présentes simulations.

De toutes les variables de l'Équation 2, seul l'écart-type de la concentration n'est pas connu. U.S. Environmental Protection Agency (1995) présente un écart-type du même ordre de grandeur que la concentration moyenne en disant que ce genre d'écart est commun dans les sols contaminés. Puisque la concentration moyenne et la distribution de probabilités des différentes situations sont connues, le principe d'intervalle de confiance borné à gauche permet d'estimer cet écart-type sans avoir recours à une approximation par la moyenne. L'Équation 3 présente cet intervalle semi-borné, où LCL est la limite inférieure de l'intervalle de confiance, Z_α la probabilité qu'une valeur soit supérieure à la LCL, et n le nombre d'échantillon composant la moyenne et l'écart-type σ (adapté de Michigan Department of Natural Resources (1994)).

$$LCL = C_{moyenne} - Z_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Équation 3- Intervalle de confiance semi-borné

Le paramètre Z_α prend la valeur de la probabilité d'occurrence de la situation dans laquelle la concentration moyenne se situe. L'exemple suivant présente l'ensemble des calculs pour l'estimation du nombre d'échantillons nécessaire pour l'acquisition d'informations lors de la première année de restauration.

Exemple du calcul du nombre minimum d'échantillons nécessaire

Calcul de l'écart-type

$C_{moyenne}$= 6 145,1 mg diesel/kg
n=34
q(s)=(0%; 1,2%, 98,8%) État du site (Distribution de probabilités des situations du site)
α=98,8 %; Z_α= 2,2571
LCL= 3 500 mg diesel/kg

$$\sigma = \left(C_{moyenne} - LCL\right)\frac{\sqrt{n}}{Z_\alpha} = \left(6145{,}1 - 3500\right)\frac{\sqrt{34}}{2{,}2571} = 6833{,}3 \text{ mg diesel/kg}$$

Il est à noter que l'écart-type calculé est du même ordre que la concentration moyenne.

Calcul du nombre d'échantillons nécessaire

α= 10 %; Z_α= 1,2816
β= 10 %; Z_β= 1,2816
$C_{moyenne}$= 6 145,1 mg diesel/kg
C_{limite}= 3 500 mg diesel/kg

$$n = \frac{\left(Z_\alpha + Z_\beta\right)^2 \sigma^2}{\left(C_{moyenne} - C_{limite}\right)^2} = \frac{\left(1{,}2816 + 1{,}2816\right)^2 \cdot 6833{,}3^2}{\left(6145{,}1 - 3500\right)^2} = 43{,}8$$

Pour s'assurer à 90% que la concentration moyenne du site est supérieure à la limite inférieure de la situation la plus contaminée, le décideur doit échantillonner 44 points sur le site.

Maintenant que la méthode permettant d'estimer le nombre d'échantillons requis pour obtenir la certitude (certitude à 90 % en raison de la valeur du paramètre β) par rapport à la situation du site est développée, les coûts d'acquisition d'informations sont simplement les coûts de prélever un échantillon (incluant les analyses) multipliés par le nombre d'échantillons nécessaire. Les coûts de prélèvement d'un échantillon sont développés de façon similaire aux coûts d'application des technologies, à l'exception qu'ils ne sont que sous forme de coûts variables. Par contre, ils sont également divisés en trois groupes identiques aux sous-groupes des coûts des technologies.

L'annexe 6 présente les coûts unitaires pour les forages, l'échantillonnage, de même que pour les diverses analyses.

Avec cette présentation de la structure de traitement des données économiques ainsi que la méthodologie permettant d'estimer le nombre d'échantillons pour connaître avec certitude la situation du site, les fondations sont mises pour montrer la portée d'un modèle, tel que METEORS en gestion de la restauration des sites contaminés. Le chapitre suivant présente les résultats ainsi que leur interprétation pour une dizaine de simulations.

5 Simulation de la restauration d'un site

La présente section a pour objectif de démontrer le potentiel d'utilisation du modèle METEORS et de l'infrastructure développée pour gérer les données nécessaires. Elle se divise en six parties. Dans un premier temps, le site contaminé sur lequel les simulations de restauration sont réalisées est décrit. Par la suite, les prémisses des simulations ainsi que les variantes entre les différentes simulations réalisées sont présentées. Finalement, les données utilisées sont introduites juste avant les deux parties portant sur les résultats des simulations, dont un résumé faisant ressortir des recommandations dans l'établissement de stratégies de restauration.

5.1 Description du site

Le site à l'étude était autrefois le siège d'une centrale électrique qui est aujourd'hui abandonnée. Certaines des activités pratiquées sur le site, en relation avec l'opération de la centrale électrique, auraient causé la contamination des sols au cours des années. La principale source de contamination proviendrait d'un réservoir de diesel de 25 000 L, dont des déversements ont été recensés.

La zone contaminée a une surface d'environ 5 263 m^2 et est constituée essentiellement de diesel dont la concentration varie de 0 à 23 000 mg/kg de sol. Une caractérisation préliminaire de 34 points sur la zone a permis, par simulation géostatistique, d'estimer une concentration moyenne de 6 145,1 mg/kg. La Figure 3 présente une vue d'ensemble du site à restaurer tandis que la Figure 4 présente la position de la zone à traiter (trait plein épais) de même que les 34 points de caractérisation préliminaire. Par les forages requis pour cette caractérisation, le profil géologique du site a pu être établi. La stratigraphie du site présente trois unités distinctes. En surface, un remblai hétérogène et perméable, constitué de sable, gravier et cailloux et dont l'épaisseur varie entre 1 et 2 mètres environ. Sous le remblai, une unité composée de sable, silt et gravier est rencontrée. Ce dépôt d'origine glaciaire (till) possède une épaisseur qui varie de quelques dizaines de centimètres à environ 1 mètre. La dernière unité rencontrée est le roc. Le roc est constitué de calcaire et il est rencontré à environ 2 mètres de profondeur en moyenne. La Figure 5 présente les coupes stratigraphiques A-A' et B-B' permettant d'observer la position de ces différentes unités.

Sur la Figure 5, on observe que le niveau de la nappe phréatique est situé à près de 1,5 mètres de profondeur sur l'ensemble du site.

En réponse à ces observations, en considérant les propriétés hydrostratigraphiques du site et en prenant en compte le type de contaminant présent, deux technologies ont été sélectionnées afin d'évaluer la réponse du modèle. Il s'agit de la bioventilation *in situ*, qui demeure une technologie bien documentée et facilement applicable, et du traitement *ex situ* en biopiles.

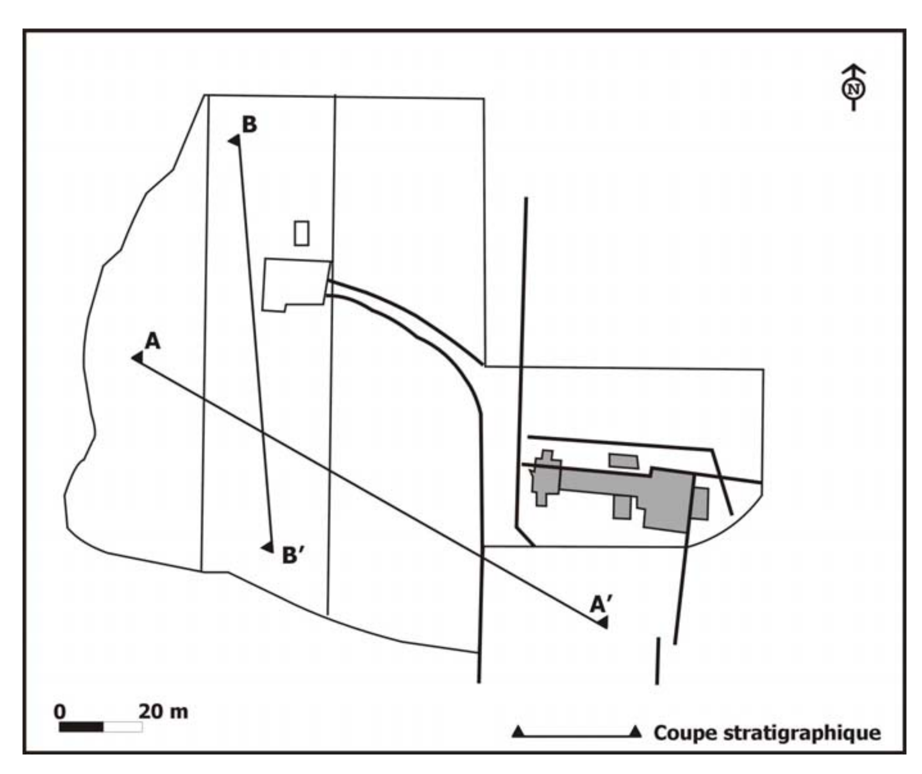


Figure 3- Aperçu du site et localisation des coupes stratigraphiques

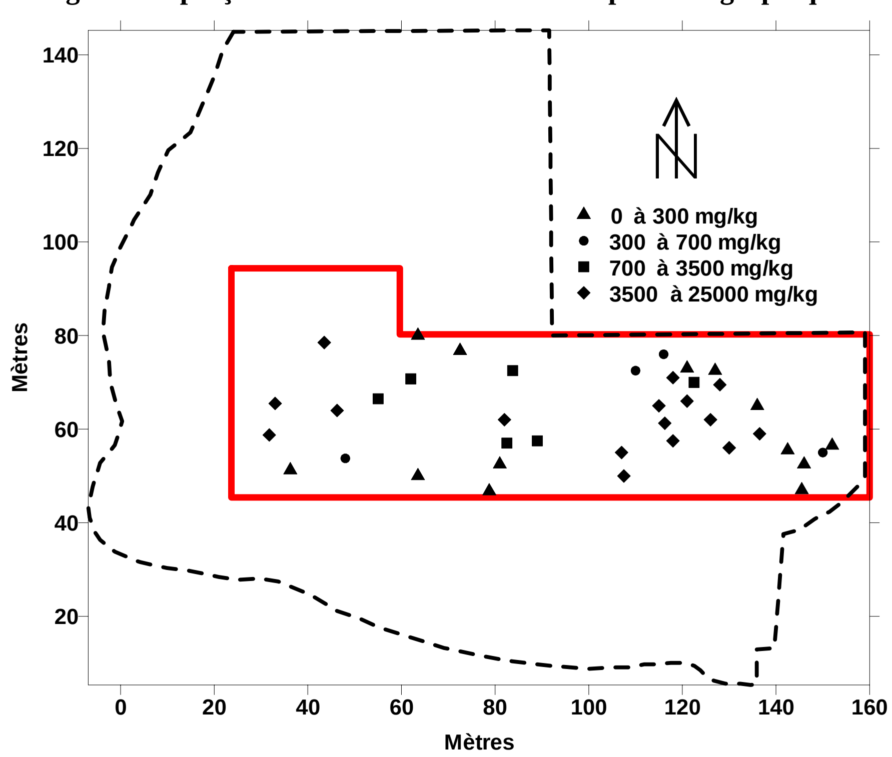
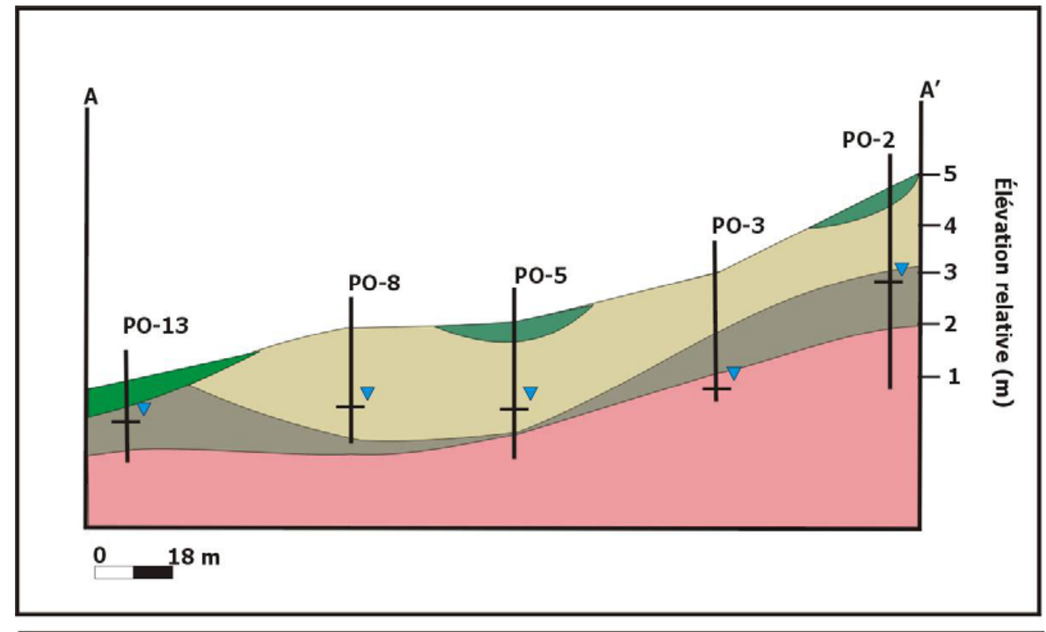


Figure 4- Zone à traiter et positionnement des points de caractérisation préliminaire



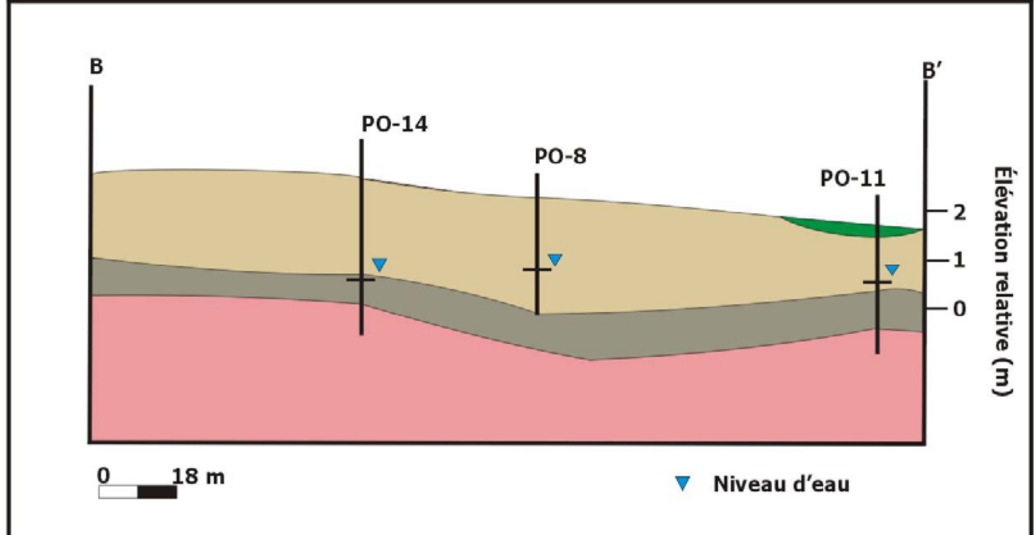


Figure 5- Coupes stratigraphiques du site.

5.2 Prémisses de la simulation

Afin d'utiliser de façon précise le modèle technico-économique pour résoudre la simulation du site décrit précédemment, certaines prémisses de départ sont nécessaires.

- Chaque traitement est appliqué durant une période d'un an avant de revoir la décision. Une année de traitement correspond à neuf mois de traitement actif, en raison d'un hiver qui ne permet pas de poursuivre les traitements biologiques.
- Le taux moyen d'enlèvement annuel d'un contaminant par bioventilation *in situ* est de 50 %. Des taux d'enlèvement supérieurs à cette moyenne sont possibles mais rares. Ainsi, un traitement nécessitant plus de 50 % et moins de 95 % d'enlèvement par année aura une faible probabilité de réussite. Un traitement nécessitant plus de 95 %

d'enlèvement par année sera jugé comme impossible et aura une probabilité de réussite nulle.

- Une première caractérisation a été réalisée avant l'application du modèle. Ainsi des données portant sur le site et la contamination sont disponibles. Cette prémisse permet dès le début d'évaluer l'état du site avec les données connues. Cette prémisse représente un cas couramment rencontré en restauration des sites. En effet, la prise de décision d'étudier les avenues possibles pour restaurer un site doit être basée sur une information révélant une contamination du site. Selon la qualité et la quantité d'informations en main, la première action de la stratégie identifiée par le modèle sera d'acquérir ou non davantage de données à propos du site.
- Puisque les deux technologies disponibles pour la restauration du site nécessitent une activité microbienne, des essais de biodégradation en microcosmes ont été effectués au préalable et ont révélé une activité microbienne capable de dégrader biologiquement le diesel.
- Puisque aucune donnée sur le pH du sol n'est disponible, le pH sur l'ensemble de la zone à traiter est considéré comme neutre et donc favorable à la biodégradation.
- Puisque aucune donnée sur la teneur en humidité du sol n'est disponible, elle est estimée à 60 % de la capacité de rétention d'eau au champ sur l'ensemble de la zone à traiter.
- Le traitement en biopile est considéré comme un traitement irréversible puisqu'il nécessite l'excavation des sols contaminés. La bioventilation *in situ*, par contre, est considérée comme un traitement réversible.
- La grandeur du centre de traitement temporaire en biopile est constante. Ceci implique que pour une concentration initiale faible, le roulement des biopiles pourra être fait plus rapidement (durée de traitement d'une biopile plus courte) que pour une concentration importante, et donc que la durée totale de la restauration sera plus courte. Une limite de 3 600 mg de diesel/kg de sol a été évaluée comme concentration supérieure limite pour que le volume de sol contaminé soit traité en une seule année. Au delà de cette concentration, le même volume de sol est traité en deux années.

5.3 Présentation des différentes simulations

Dans le but de démonter la fonctionnalité de la structure de développement de stratégies de restauration d'un site contaminé à l'aide du modèle METEORS, douze simulations ont été réalisées à partir du même site contaminé au diesel, mais en variant deux paramètres, soit la durée maximale permise de la restauration et les bénéfices associés au site restauré.

Les bénéfices de la restauration sont définis dans le modèle comme tout gain positif réalisé durant et après la restauration et découlant directement du caractère décontaminé du site. Seuls les bénéfices d'après restauration ont été retenus dans ce projet et ont été divisés en deux catégories. En réponse à la décontamination d'un terrain, la valeur marchande de ce dernier devrait augmenter en raison de sa plus grande flexibilité d'utilisation. La première catégorie de bénéfices est donc la valeur marchande du site s'il est vendu après sa restauration. Par contre, le propriétaire d'un site contaminé peut vouloir décontaminer son site sans pour autant s'en départir par la suite. Dans ce cas, il est considéré que le propriétaire a une opportunité de développement sur son site; par exemple, la construction d'un immeuble à revenu ou d'une usine, qui lui rapportera des bénéfices sur une période de temps donnée. Cette source de bénéfices compose la seconde catégorie, celle où la valeur du site est dictée par la valeur récurrente associée à un projet réalisé sur le site. Il est à noter que peu importe la catégorie des bénéfices, ces derniers sont fonction de la situation du site la plus probable. Ils pourraient également être fonction de l'état du

site. L'utilisation de la situation la plus probable pour fixer la valeur des bénéfices a été retenue pour fins de simplification de la résolution.

Pour différentes raisons, la durée maximale permise pour restaurer un site peut être limitée. C'est pourquoi les deux catégories ont été sous-divisées en six sous-catégories représentant différentes restrictions quant à la durée maximale de restauration. Ces restrictions vont de 1 an à 5 ans en plus d'une sous-catégorie non restreinte. L'intérêt de ces restrictions est d'observer leurs effets sur l'ensemble des technologies disponibles pour la restauration.

5.4 Présentation des données de simulation

Chacune des douze simulations de restauration du site contaminé au diesel est basée sur un ensemble de données. Ces dernières sont notamment les valeurs des paramètres du site permettant d'évaluer la performance des technologies à décontaminer le sol d'une concentration fixée jusqu'à une concentration donnée (voir Section 5.1, Annexe 1 et Annexe 2).

Trois situations possibles sont retenues pour représenter l'évolution du site. Pour le bien de l'exercice, ces situations sont inspirées des critères de décontamination établis par le Ministère de l'environnement du Québec (Ministère de l'Environnement du Québec 1999). Il est à noter que ces plages peuvent facilement être adaptées à la résultante d'une analyse de risque simplifiée ou détaillée, telle que proposée dans la législation française. Ainsi, la situation la plus faible (situation légère) comprend les concentrations inférieures au critère B, soit inférieures à 700 mg diesel/kg. La situation de concentration intermédiaire (situation modérée) est équivalente à la plage B-C, soit de 700 à 3 500 mg/kg. Finalement, la situation la plus contaminée (situation extrême) correspond à toute concentration supérieure au critère C, soit 3 500 mg/kg. Ainsi, en incertitude sur la véritable situation du site, la notion d'état du site est utilisée pour représenter une distribution des probabilités associées à ces trois situations.

Les distributions de probabilités des situations du site (état du site) sont obtenues à partir de simulations de concentrations sur l'ensemble de la zone à traiter. Ces concentrations sont générées aléatoirement en respectant le variogramme des 34 points de concentrations connues sur le site. Ce variogramme permet de prendre en considération dans les simulations des concentrations, la variance entre les concentrations connues, de même que la distance séparant chacun de ces points. Ainsi, deux points rapprochés de forte concentration auront moins d'influence sur la génération des concentrations que deux points éloignés de concentrations équivalentes. Les concentrations sont générées sur une grille de maillage de 10 mètres par 10 mètres et recouvrant l'ensemble de la zone à traiter. Pour chaque nœud du maillage, 750 générations de concentrations ont été réalisées. Par la suite, l'occurrence des concentrations ainsi obtenues a été classée afin d'en faire ressortir un profil de concentration sous forme d'une distribution de probabilités de plages de concentrations. Ce profil est l'état du site considéré dans la simulation. Ce processus de génération de concentrations et de distribution de probabilités est réalisé pour chaque scénario et pour chaque période d'application du modèle; en d'autres termes, à chaque fois que les concentrations ont pu être modifiées par l'application d'une technologie.

Les données de coûts de traitement pour les technologies utilisées dans les simulations, de même que celles des coûts d'acquisition d'informations sont celles présentées à la section 4. Pour ce qui est des bénéfices associés à la restauration du site, la règle suivante a été établie (peu importe le type de bénéfice) à savoir, si la situation la plus probable est la légère, sa valeur est maximale. Si c'est la situation modérée qui a le plus de chance de survenir, sa valeur est équivalente à la moitié de la valeur maximale. Finalement, si la probabilité d'occurrence la plus grande de l'état du site est associée à la situation extrême, sa valeur est nulle. L'intérêt d'utiliser deux catégories de bénéfices est également d'observer l'effet de l'ordre de grandeur des bénéfices sur la stratégie de restauration. Ainsi, la valeur marchande du site a été fixée comme inférieure à la valeur des gains

récurrents. Le Tableau 3 suivant présente, pour chaque catégorie, la valeur des bénéfices selon la situation du site. Il est à noter que ces bénéfices, comme tous les coûts considérés dans les simulations, sont actualisés en date de la première année de prise de décision afin de pouvoir comparer l'ensemble des scénarios de restauration peu importe leur durée. Le taux d'actualisation utilisé est de 3,5 %. La valeur marchande maximale du site est fixée à partir d'un coût unitaire de 113,02 €/m^2 (moyenne des coûts unitaires de vente d'une quinzaine de sites à vocation résidentielle et semi-commerciale dans la banlieue de Montréal, évaluation effectuée en mars 2001). La valeur maximale d'un développement de projet sur un site restauré est établie en raison de la réalisation d'un projet d'une durée de vie de 20 ans et rapportant 140 000 € nette annuellement. Un taux d'actualisation de 3,5 % a également été utilisé pour fixer la valeur totale de ce projet.

Tableau 3- Bénéfices associés au site restauré

Situation du site la plus probable	Valeur marchande du site	Valeur d'un développement de projet
Situation légère	618 406 €	1 989 737 €
Situation modérée	309 203 €	994 868 €
Situation extrême	0 €	0 €

Le Tableau 4 présente pour sa part les coûts périodiques d'application des différentes technologies retenues dans ces simulations. Tel qu'expliqué précédemment, les coûts totaux de traitement sont divisés en deux, soit les coûts fixes et les coûts variables. Seuls les coûts variables s'appliquent tout au long de la durée du traitement par la même technologie. C'est pour cette raison que les coûts de traitement en première période d'utilisation sont plus élevés que par la suite. Bien que le traitement en biopile soit également caractérisé par des coûts fixes et variables, ce concept de première période d'utilisation ne s'applique pas pour le traitement en biopile puisque ce dernier est considéré comme direct, c'est à dire que connaissant avec certitude la performance du traitement, et sachant qu'elle est maximale, le traitement a été conçu pour la décontamination de l'ensemble du site. Ainsi, à partir de son application, l'ensemble du sol est traité sur une période relativement courte. Il a été évalué que pour une capacité de traitement donnée, l'ensemble du sol est traité en deux ans (à raison de deux séries de cinq biopiles par année) si la concentration initiale est supérieure à 3 600 mg/kg. Par contre, la durée totale de la restauration diminue à une année si la concentration est inférieure à 3 600 mg/kg. Dans les deux cas, le nombre de biopiles nécessaire pour le traitement est le même, soit 19, mais puisque la durée de traitement de chaque biopile est plus courte, la durée totale de la restauration est également raccourcie. C'est pour cette raison que deux coûts de traitement apparaissent pour la biopile. Les coûts fixes du traitement en biopile sont associés à la mise en place du centre de traitement, tandis que les coûts variables sont associés à chaque biopile. Le nombre de biopiles étant identique, les coûts variables sont les mêmes. Or, puisque dans le cas d'une concentration supérieure à 3 600 mg/kg une quantité de sol est traité la seconde année, la moitié de ces coûts variables sont actualisés par rapport à la première année. Ceci donne l'impression au Tableau 4 que pour de fortes concentrations, le traitement en biopile est plus économique que pour de faibles concentrations, mais il ne s'agit que d'un phénomène d'actualisation des flux qui eux, sont identiques.

Tableau 4- Coûts périodiques de traitement du sol

		Coûts de traitement	
		Première période d'utilisation	Période d'utilisation suivante
Bioventilation *in situ*		162 153 €	47 264 €
Biopile	> 3 600 mg/kg	751 141 €	
	< 3 600 mg/kg	755 621 €	

5.5 *Résultats des simulations*

À moins d'avis contraire, les résultats des simulations seront présentés, pour chaque contrainte temporelle, en deux parties, chacune portant sur le type de valeur utilisé pour la simulation (valeur mobilière du site ou valeur d'un projet). Au total, les résultats de dix simulations sont présentés dans cette section.

Il est à noter que pour l'ensemble des simulations, le gestionnaire du site est en mesure de supporter les déboursés des années de traitement en attendant les gains des dernières années de traitement. En effet, bien qu'une stratégie soit économiquement positive, un gestionnaire de site qui désire suivre une telle stratégie doit comprendre que les stratégies sont établies sur des déboursés en début de traitement et des gains en fin de restauration.

5.5.1 *Simulations sans contrainte temporelle*

Bien que ces simulations soient dites non-limitées en temps, elles ont dû être bornées temporellement afin de permettre une évaluation mathématique des différents scénarios et stratégies développés par l'application du modèle METEORS. Cette limitation temporelle a été rendue nécessaire en raison du mode d'évaluation des concentrations restantes dans le sol après l'application d'une technologie durant une année et de l'efficacité de cette technologie. L'évaluation de la restauration est faite à chaque période pour le passage de chaque situation possible à toutes les situations de concentration inférieure ou égale à la concentration initiale. Avec les valeurs des différents paramètres du site, la performance maximale (sans considérer le facteur limitatif de la charge en contaminant à biodégrader) de la bioventilation *in situ* est inférieure à 90 % (83,2 %) (voir Annexe 1 pour les paramètres considérés dans l'évaluation de l'efficacité de la bioventilation *in situ*). Ceci signifie qu'au mieux, il y a près de 17 % des chances qu'avec la bioventilation *in situ* il n'y ait pas de modification de situation. Cette absence de modification de la situation du site sera possible avec l'utilisation de toute technologie de performance inférieure à 100 %. De plus, pour permettre l'évaluation du taux d'enlèvement de chaque scénario, la concentration finale a été fixée à la concentration supérieure de la situation finale. Or, le taux d'enlèvement pour une concentration restant dans la même situation ne peut être calculé puisqu'il serait le rapport entre la différence des concentrations initiale et finale et la concentration initiale. La concentration finale serait supérieure à la concentration initiale et le taux d'enlèvement négatif. Dans ce cas, le taux d'enlèvement considéré a été établi à la plus petite valeur de la moitié du taux pour le passage à la première situation de concentration inférieure ou 50 % d'enlèvement. Ainsi, avec une probabilité non nulle d'utiliser un traitement ne modifiant pas la situation et un taux d'enlèvement au plus de 50 % pour cette figure de cas (situation finale identique à la situation initiale), les probabilités d'occurrence des situations de fortes concentrations vont diminuer avec l'augmentation de la durée du traitement, mais ne deviendront jamais nulles. C'est pour cette raison qu'une limitation temporelle a été établie dans cette simulation en considérant que lorsque cette durée maximale est atteinte, les probabilités d'occurrence des scénarios nécessitant encore un traitement sont très faibles. La limite a été fixée à six années de traitement. Lors de la présentation des résultats des simulations non-limitées dans le temps, il sera démontré que cette durée maximale forcée n'entraîne aucune modification significative des stratégies de restauration.

5.5.1.1 Valeur marchande du site

Pour chaque année de restauration, de l'année 1 à l'année 6, le choix stratégique est orienté vers le traitement sans acquisition d'information supplémentaire. Cette préférence pour ce choix en incertitude est due premièrement à une valeur trop faible de la valeur d'option théorique et deuxièmement à un trop grand nombre de puits nécessaire pour obtenir une information parfaite, impliquant ainsi un coût trop important pour l'acquisition d'informations. Le ratio entre le nombre d'échantillons nécessaire pour obtenir une information parfaite et le nombre

d'échantillons maximum selon la valeur d'option théorique (ratio valeur d'option théorique-coût pour un échantillon) est en moyenne de 24,3 mais varie de 8,4 à 154,3. Cette plage de ratios, toujours supérieure à l'unité, indique clairement que le choix stratégique passe par le traitement sans acquisition d'information supplémentaire.

Pour chaque année de restauration, le choix stratégique de la technologie s'arrête sur la technologie réversible, la bioventilation *in situ*. Ce choix se justifie par la différence de coûts de traitement entre les deux technologies disponibles. Lors de la première année de traitement, le ratio entre les coûts de traitement en biopile et la bioventilation *in situ* est de 4,7. Ce ratio augmente à 16 pour les années suivantes puisque seuls les coûts variables de la bioventilation *in situ* sont pris en considération dans le calcul, les coûts fixes n'étant applicables qu'à la première année. Il faut toutefois remarquer que le traitement en biopile ne nécessite qu'un seul investissement (réparti sur une année ou deux selon la concentration initiale à traiter, la limite étant établie à 3 600 mg de diesel / kg de sol). Malgré cela, après 10 années de traitement en bioventilation *in situ*, la somme des montants actualisés investis dans ce traitement serait inférieure aux coûts actualisée de l'application d'un traitement en biopile réalisé à la 10ème année.

Ainsi donc, la stratégie optimale de restauration du site contaminé virtuel se résume en un traitement d'une durée maximale de six ans par bioventilation *in situ*, sans acquisition d'information supplémentaire entre chaque année de traitement. La valeur espérée de cette stratégie est de 313 793 € (valeur actualisée à la première année de décision). La stratégie optimale est composée de 91 scénarios dont les probabilités d'occurrence sont représentées à la Figure 6. Une vue détaillée des probabilités inférieures à 1 % permet de constater la quantité importante de scénarios à faibles (très faibles) probabilités d'occurrence. Le tableau A7-1 à l'Annexe 7, présente un résumé des caractéristiques des 91 scénarios composants cette stratégie optimale. Le scénario ayant la plus grande probabilité d'occurrence (45,3 %) dans cette stratégie possède une valeur réelle de 325 349 € et une durée de traitement de 3 ans. La moyenne pondérée de la durée des 91 scénarios de restauration est de 3,2 années.

Si une quantité impressionnante de scénarios compose la stratégie optimale, il est à noter que les cinq scénarios ayant les plus grandes probabilités d'occurrence représentent à eux seuls 81,6 % des probabilités cumulatives de tous les scénarios de la stratégie optimale et ont des durées de traitement variant entre deux et quatre années. Cette prédominance des scénarios de durées variant entre deux et quatre ans peut s'observer également sur la Figure 7. Cette dernière représente les probabilités cumulatives des scénarios ayant des durées de restauration similaires. Les scénarios ayant une durée de restauration totale de trois ans ont plus de 50 % des chances de se réaliser. Ceux ayant des durées totales de deux et quatre ans ont des probabilités d'occurrence respectives de 15,9 % et 21,6 %. Les probabilités chutent dramatiquement sous les 1,5 % pour les scénarios de un an et illimités. Parmi les scénarios dits illimités, certains se terminent réellement après six ans de traitement et d'autres ont été contraints de s'arrêter à six années de traitement en raison des difficultés opérationnelles que représentaient les simulations illimitées. Des 1,1 % de chances qu'ont les scénarios illimités de se produire, les scénarios contraints à l'arrêt ont 0,17 % de chances de se produire. Étant arrêtés avant l'atteinte des objectifs de restauration, ces scénarios affectent à la baisse la valeur de la stratégie optimale. Or, la valeur pondérée de ces scénarios (13 au total) est aussi faible que - 194 €, représentant ainsi une faible contribution négative sur une valeur totale de 313 793 €. Devant de telles observations, l'hypothèse que six années de traitement représentent un traitement illimité est jugée valide et n'affecte pas significativement les résultats de la simulation.

Au lieu de simplement comparer les valeurs des stratégies, qui sont les moyennes pondérées des scénarios qui les composent et qui ne représentent pas directement l'étendue de ces scénarios, un indice de risque a été établi pour permettre de comparer différentes simulations et/ou stratégies entre elles. Cet indice, qui prend en considération la répartition des valeurs des scénarios, est le

ratio entre l'écart-type des scénarios composants une stratégie et la valeur de cette dernière (la moyenne pondérée de ses scénarios). Pour la présente simulation, l'indice de risque est de 50,5 %. Plus un tel indice est loin de zéro, plus les valeurs des scénarios sont éloignées de la valeur moyenne et donc, plus une restauration qui suivra une telle stratégie courra le risque qu'un scénario de valeur bien différente à celle de la stratégie se réalise.

Pour résumer pour cette première simulation, en raison de la grande différence de coûts d'utilisation des technologies et puisqu'il n'y a aucune contrainte économique ou temporelle, l'utilisation de la technologie la moins coûteuse (bioventilation *in situ*) est préférée à la technologie coûteuse (biopile). Ainsi, malgré le caractère incertain de la restauration par bioventilation *in situ*, cette dernière est préférée pour atteindre les objectifs de restauration. Cette préférence inconditionnelle à la bioventilation *in situ* est basée sur deux caractéristiques importantes en plus de l'absence de contrainte de temps de restauration. Il s'agit de l'écart important entre les coûts de traitement des deux technologies (écart variant de 4 à 16 fois selon que la bioventilation *in situ* en était à sa première période d'utilisation) et la valeur du site restauré qui est plus grande que les coûts (en valeur absolue) de 10 années de traitement par bioventilation *in situ*, mais inférieure aux coûts (en valeur absolue) de traitement par biopile. Des modifications à ces deux caractéristiques, notamment des coûts de traitement en biopile moins élevés que la valeur du site, pourraient modifier le choix optimal de restauration et ce, malgré l'absence de contrainte dans le temps. Selon les résultats obtenus précédemment, l'utilisation d'une technologie peu coûteuse, flexible, mais d'efficacité incertaine, est avantageuse devant des technologies certaines, mais très coûteuses. À l'heure actuelle, le recours à une simulation de la stratégie de restauration est la solution privilégiée pour s'assurer que le cas étudié répond aux deux caractéristiques présentées précédemment.

Bien que l'acquisition d'informations permette de connaître la situation réelle du site avant le choix de la technologie à appliquer, la valeur d'option théorique n'est pas suffisante pour couvrir ces coûts d'acquisition. Puisque l'acquisition d'informations est orientée vers une information parfaite, les coûts d'acquisition sont très importants et largement supérieurs à la valeur d'option théorique.

Pour des raisons de représentation, l'arbre de décision de la stratégie optimale de cette simulation n'est pas présenté dans ce rapport. Par contre, un arbre plus simple sera présenté plus loin dans le cadre d'une autre simulation.

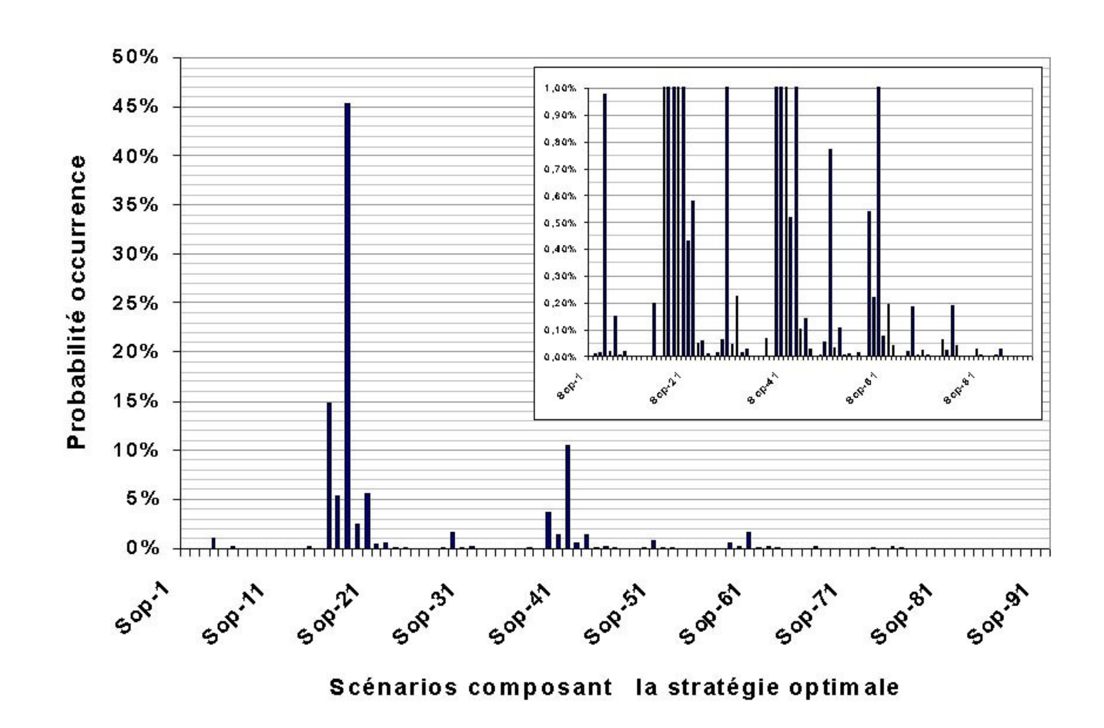


Figure 6- Probabilité d'occurrence des scénarios de la stratégie optimale, valeur marchande, durée de la restauration non limitée

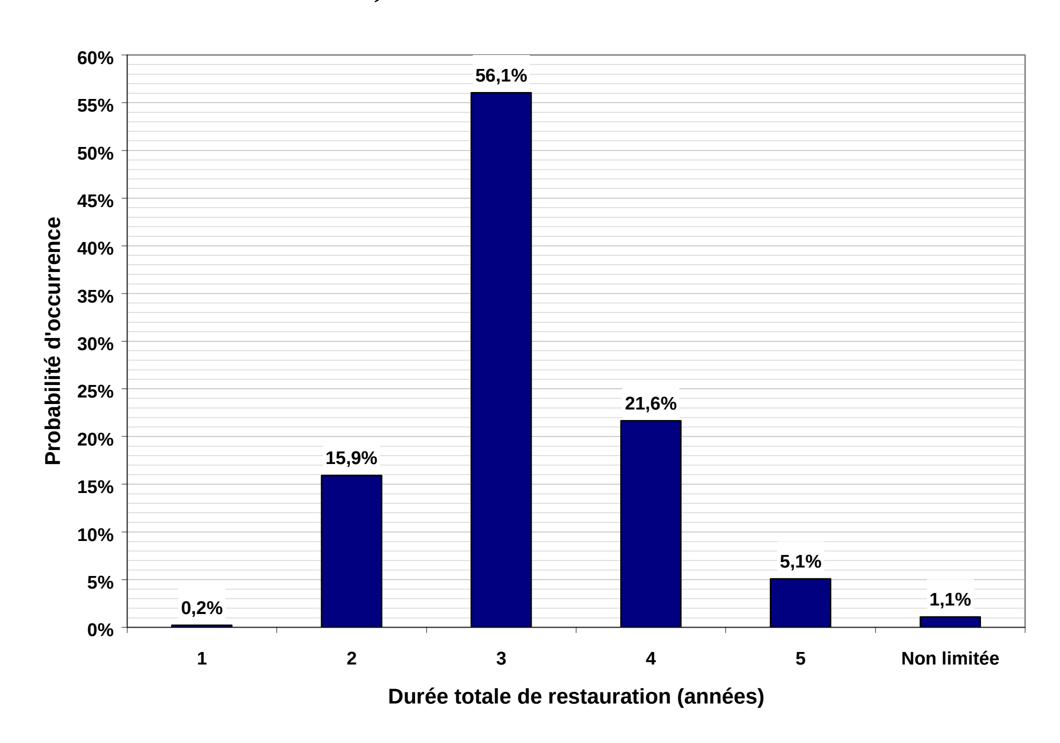


Figure 7- Probabilité d'occurrence maximale selon la durée du traitement

5.5.1.2 Valeur d'un projet

Sur un plan décisionnel, la stratégie optimale de cette simulation est similaire à la stratégie optimale de la simulation par la valeur marchande du site. En effet, le choix de technologie est orienté vers la bioventilation *in situ* en raison des coûts élevées de traitement par biopiles. Dans cette simulation également, l'acquisition d'informations n'est pas économiquement avantageuse, bien qu'elle le soit en matière de décision. La valeur de cette stratégie est de 1 585 283 € avec une durée moyenne de 3,19 années. Le scénario ayant le plus de chance de se réaliser dans cette stratégie optimale à une valeur réelle de 1 605 500 €. L'indice de risque de cette stratégie est de 23,7 %. Comme pour la simulation précédente, les cinq scénarios les plus probables ont une probabilité cumulative de 81,6 %.

En résumé, les deux simulations non limitées dans le temps, valeur du terrain et valeur d'un projet à durée fixée, sont, somme toute, similaires et pourraient se redéfinir comme suit : la seconde simulation est identique à la première à la différence que la valeur du terrain est beaucoup plus élevée que dans la première.

5.5.2 Simulations avec contrainte temporelle

La série suivante de résultats porte entièrement sur des simulations dont la durée maximale a été limitée entre une à quatre années de traitement. Des simulations dont la durée maximale permise était de cinq années ont également été réalisées mais la forme des stratégies optimales de restauration étant similaire à celles d'une durée limitée à quatre années, elles ne sont pas soulevées au présent rapport. De plus, des limitations supérieures à cinq années de traitement n'ont pas été réalisées puisque les simulations non contraintes dans le temps (qui étaient en réalité limitées à six années) présentent des stratégies dont les durées moyennes sont de 3,2 ans.

5.5.2.1 Durée maximale de 1 an

Puisque la forme des stratégies optimales de restauration (SOR) est la même pour les simulations par la valeur marchande du site (SVM) et celle de la valeur d'un projet (SVP), leurs résultats sont présentés en une seule partie.

Lors de la première année de restauration, la concentration en contaminant du site est élevée (6 145,1 mg diesel / kg sol) et supérieure à la limite pour un traitement en biopile en une année (3 6000 mg diesel / kg sol). En raison de la contrainte temporelle ne permettant pas une durée de restauration de plus d'une année, le traitement en biopile est exclu de l'ensemble des technologies possibles. Il ne reste plus que la bioventilation *in situ* pour restaurer le site. Le traitement en biopile pourrait être envisagé si le décideur savait avec certitude que le site est contaminé en deçà de la limite de 3 600 mg diesel / kg sol. La probabilité d'occurrence de cette situation est par contre faible (1,2 %). De plus, pour savoir avec certitude que cette situation existe, le décideur doit acquérir de l'information supplémentaire sur site, ce qui est économiquement non envisageable. Ainsi, ne pouvant être assuré que le site peut se traiter par biopile en moins d'un an, le décideur doit choisir dans un contexte d'incertitude un traitement en bioventilation qui sera appliqué sur une période d'un an.

Selon cette stratégie optimale, les probabilités que le site soit restauré en une année en deçà du critère B (situation légère) sont de 0,21 %, dans la plage B-C (situation modérée) de 75,78 % et au-dessus du critère C (situation extrême) de 24,01 %. Il existe donc une probabilité non négligeable (pratiquement un quart) que le traitement par bioventilation *in situ* ne permette aucune réalisation (vente ou développement) sur le site après la restauration limitée à une année de traitement. Cette forte possibilité qu'un scénario à valeur négative (scénario dont l'état final est associé à une valeur nulle pour le site) se produise se traduit dans l'indice de risque de ces simulations qui sont de 343,7 % et 136,3 % respectivement pour la SVM et la SVP. L'indice de risque de la SVP est plus faible que celui de la SVM en raison du grand écart de ces valeurs (en

faveur de la SVP). En effet, le scénario à valeur négative qui produit ces indices élevés de risque est le même pour les deux simulations (aucun bénéfice et un coût de traitement en bioventilation *in situ*). Par contre les autres scénarios ont des bénéfices beaucoup plus grands dans la SVP que dans la SVM. Ainsi le scénario à valeur négative a moins d'influence sur la moyenne pondérée des scénarios, produisant une moyenne plus grande et diminuant ainsi l'indice de risque.

Les deux stratégies optimales ont une durée pondérée d'un an, équivalente à la contrainte temporelle, et le scénario présentant la plus grande probabilité d'occurrence a également une durée réelle d'un an. Les valeurs des SOR sont respectivement de 73 457 € et 595 925 € pour la SVM et la SVP. Les scénarios ayant la plus grande probabilité d'occurrence possède une valeur de 147 051 € et 839 016 € respectivement pour la SVM et la SVP.

En résumé, bien qu'ayant une valeur positive, la SOR, pour une durée de restauration limitée à une année, est risquée, comme le montre l'indice de risque et la probabilité non négligeable de ne pas avoir de modification de la situation initiale. Le choix final de suivre cette SOR repose sur l'attitude du décideur face au risque que représente le scénario à valeur négative et ayant 24 % des chances de se réaliser. Il faut aussi noter que la situation légère n'est, à toutes fins pratiques, pas atteignable par la SOR (seulement 0,21 % de probabilité d'occurrence). La SOR est intéressante dans ce cas, principalement pour une réduction de la contamination dans la situation modérée.

5.5.2.2 Durée maximale de 2 ans

Il a été observé précédemment qu'une limitation d'une année pour la restauration du site permettait de réduire la contamination du site mais avec beaucoup d'incertitude, et sans pour autant accéder à la situation légère. En augmentant la contrainte temporelle à deux ans, des modifications se font déjà ressentir dans la composition des SOR.

5.5.2.2.1 Valeur marchande du site

Avec une possibilité d'utiliser un traitement sur une période de deux ans, dès la première année de traitement, le traitement en biopile fait maintenant partie des technologies possibles pour la restauration du site virtuel contaminé. Or, la valeur du site restauré (valeur marchande) est inférieure aux coûts totaux de restauration en biopile et donc, le traitement par bioventilation *in situ* se révèle, une fois de plus, le choix le plus avantageux lors des deux années de traitement. La stratégie optimale est donc constituée du choix, à chaque année, de la bioventilation *in situ* sans acquisition d'information supplémentaire.

La durée pondérée de la restauration est de deux ans, tout comme la durée réelle du scénario ayant la plus grande probabilité d'occurrence. La valeur de la stratégie est de 126 521 € avec un indice de risque de 157,8 %, comparativement à 343,7 % pour la SVM limitée à une année. La possibilité de traiter le site une année supplémentaire réduit donc la variabilité des scénarios composant la stratégie optimale. La SOR n'est composée que de 15 scénarios, dont la probabilité d'occurrence des trois premiers totalise 92,3 %. Les deux scénarios les plus probables (probabilité combinée de 77,5 %) sont associés à la situation finale modérée, mais ont tout de même une valeur positive de 90 929 €. En limitant la durée maximale de la restauration à deux années, la meilleure stratégie ne parvient pas à assurer, avec assez de certitude, l'atteinte de la situation légère. À la fin de ce chapitre, la Figure 16 présente la répartition des scénarios composant la stratégie optimale selon la situation finale atteinte. Pour les scénarios se terminant dans la situation extrême, comme aucune valeur de site n'est associée à cette situation mais que des coûts de traitement ont été engagés, la valeur de ces scénarios est négative. Pour cette simulation, il y a moins de 5 % des chances que la situation finale soit extrême. Le choix de suivre une telle stratégie dépend de l'attitude du décideur face au risque que représente la possibilité qu'un scénario à valeur négative se réalise.

5.5.2.2.2 Valeur d'un projet

Il a été exposé précédemment que pour une restauration limitée à deux années de traitement, la biopile faisait partie de l'ensemble des technologies envisageables. Puisque l'usage de la biopile assure l'atteinte d'une concentration inférieure au critère B (situation légère), et puisque la valeur d'un tel site restauré est augmenté considérablement par la valeur d'un projet (comparativement à la valeur marchande du site), l'utilisation de cette technologie est économiquement et techniquement viable et est préférée à un traitement par bioventilation *in situ*. Cette dernière technique n'assure pas à 100 % l'atteinte de la situation légère, diminuant ainsi la valeur du site par la considération d'un site restauré à la situation modérée et même possiblement à la situation extrême. La stratégie optimale donc est d'utiliser dès la première année et pour une période de deux ans (puisque la concentration initiale moyenne est supérieure à 3 600 mg/kg), un traitement en biopile sans acquisition d'information. La durée pondérée de cette stratégie est de deux ans, tout comme la durée réelle du scénario présentant la plus grande probabilité d'occurrence. La valeur de la SOR est de 1 171 316 € et est composée de trois scénarios ayant tous une valeur équivalente à celle de la SOR. En raison du potentiel élevé d'atteindre la situation légère et de la différence positive entre la valeur du projet et les coûts totaux de traitement en biopile, aucun scénario de la stratégie optimale n'a de valeur négative. Ceci assure ainsi l'obtention d'un scénario dont la valeur est équivalente à la valeur de la stratégie optimale. La SOR dans cette situation est qualifiée de *certaine* et *sans risque,* ce qui lui vaut un indice de risque nul.

Cette simulation permet d'observer qu'en incertitude sur la situation du site et de la performance d'une technologie, l'utilisation d'une technologie certaine peut être avantageuse même si celle-ci est la plus coûteuse et la plus rigide, à condition que les bénéfices finaux de la restauration couvrent les frais de restauration par cette technologie.

5.5.2.3 <u>Durée maximale de 3 ans</u>

Les simulations limitées à une durée maximale de trois ans permettent d'observer tout le potentiel d'un modèle technico-économique de génération de stratégies de restauration. La simulation la plus intéressante est la SVP mais la SVM est tout de même présentée à titre comparatif.

5.5.2.3.1 Valeur marchande du site

Bien que le traitement par biopile dès la première année soit possible en raison de la durée maximale de la restauration, la valeur du site restauré (valeur déterminée par la valeur marchande du terrain) est inférieure aux coûts totaux du traitement en biopile (en valeur absolue). Ce traitement en biopile a une valeur négative contrairement à la valeur positive associée au traitement par bioventilation *in situ*, choix par contre qui n'assure pas avec certitude l'atteinte de la situation légère. De plus, comme dans toutes les SVM observées précédemment, la différence entre la valeur de la restauration avec informations supplémentaires (valeur avant les coûts d'acquisition) et la valeur de la restauration sans information supplémentaire (soit la valeur d'option théorique) est inférieure aux coûts d'acquisition d'informations, éliminant ainsi le choix d'acquérir une certitude face à la situation du site avant de sélectionner la technologie la plus appropriée.

Dans une telle limitation, la stratégie optimale se définit par l'utilisation de la bioventilation *in situ* à chaque année de traitement et ce, sans acquisition d'information supplémentaire. La durée pondérée de la stratégie optimale est de 2,84 années tandis que la durée du scénario le plus probable est de 3 ans. La valeur de la SOR est de 253 748 € et l'indice de risque est de 69,4 %. Le scénario le plus probable (45,3 % de probabilité) a une valeur de 325 349 € avec une durée réelle de 3 ans. Les cinq scénarios les plus probables totalisent une probabilité d'occurrence de 88,7 %. De ces scénarios, les premier, second et cinquième sont associés à une situation légère en fin de restauration tandis que les troisième et quatrième sont associés à une situation modérée.

La limitation dans le temps de la restauration implique un risque non nul de laisser le site dans une situation extrême. La valeur du site dans ce cas est nulle mais la valeur du scénario est négative (-251 940 €) en raison des coûts de traitement. La possibilité d'obtenir ce scénario en optant pour la SOR peut décourager un gestionnaire de site, mais il faut comprendre que la probabilité d'occurrence de ce scénario n'est que de 0,6 %. La décision finale d'opter pour la SOR repose donc sur l'attitude du gestionnaire face à ce risque.

5.5.2.3.2 Valeur d'un projet

Par opposition à la SVM de même contrainte temporelle, les bénéfices après restauration sont beaucoup plus avantageux dans cette simulation. Si, dans la simulation précédente, l'utilisation de la biopile n'était économiquement pas rentable, elle l'est dans celle-ci. Pour ainsi dire, les deux technologies rapportent, en fin de traitement, des gains nets positifs. Le choix de la technologie se fait donc par rapport à la technologie ayant la plus grande valeur. Le traitement par bioventilation *in situ* possède les coûts les moins élevés mais également les efficacités les plus faibles. Les économies ainsi réalisées par le traitement sont en quelque sorte atténuées par le risque de ne pas atteindre les situations les plus avantageuses. À l'opposé, le traitement en biopile possède les coûts de traitements les plus élevés mais également les efficacités les plus fortes (certitude d'atteindre la situation légère). Ainsi les dépenses majeures encourues par le traitement sont en partie compensées par les bénéfices élevés des scénarios engendrés. Devant une telle explication, il faut comprendre que le traitement par bioventilation *in situ* est désavantagé par le doute qu'il y a sur la situation finale qui sera atteinte. Si la concentration initiale est trop élevée, l'atteinte de la situation finale sera difficile. Par contre, si la concentration initiale est moyenne (situation modérée), l'atteinte de la situation légère est tout à fait envisageable par la bioventilation *in situ*. Dans ce cas, l'acquisition d'informations permettant de connaître avec certitude (établie à 90 %) la situation réelle initiale du site pourrait être économiquement et opérationnellement avantageuse. La réalisation de cette acquisition d'informations dépend de son coût par rapport à la valeur d'option théorique. Si la valeur d'option théorique est plus grande que le coût d'acquisition d'informations, alors cette connaissance avec certitude de la situation du site avant le choix de la technologique est économiquement avantageuse.

La présentation des résultats de cette simulation fait référence à la Figure 8. Lors de la première année de restauration, la SOR est basée sur l'utilisation de la bioventilation *in situ* sans acquisition d'information. Par contre, au début de la deuxième année de restauration, le choix du décideur se fait selon l'état du site à cette même période. Si l'état du site indique la probabilité la plus grande pour la situation légère, la restauration se termine après une seule année de traitement (scénarios 1, 2 et 8). Si la probabilité la plus grande dans l'état est associée à la situation modérée, la bioventilation *in situ* sans acquisition d'information est maintenue durant la deuxième année (choix pouvant mener aux scénarios 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12 ou 13, ils seront discuter un peu plus loin dans cette section). Si, par contre, la plus grande probabilité est associée à la situation extrême, c'est à dire qu'il n'y a pas eu de modification de situation lors du traitement en première année, l'acquisition d'informations devient une action avantageuse pour le gestionnaire puisque :

- il ne reste plus que deux années possibles de restauration;
- la concentration moyenne sur le site est encore élevée (estimée à 4 824 mg/kg, situation extrême);
- l'utilisation de la biopile dans de pareilles conditions ne peut être faite qu'à ce moment, en raison des deux années nécessaires pour décontaminer le volume total de sol;

- l’utilisation de la bioventilation *in situ* sera économiquement avantageuse par rapport à la biopile si la situation réelle se révèle modérée;
- l’utilisation de la biopile est avantageuse techniquement par rapport à la bioventilation *in situ* si la situation réelle du site est extrême puisque deux années de traitement par bioventilation *in situ* ne permettra pas d’atteindre avec assez de certitude la situation légère.

Ces raisons justifiant l’acquisition d’informations se retrouvaient également dans les simulations observées précédemment, mais soit que les bénéfices associés au site étaient trop faibles ou soit que ce dilemme entre biopile et bioventilation *in situ* intervenait trop tard dans le processus de décision et que trop d’argent avait été investi par la bioventilation *in situ* par rapport aux bénéfices finaux pour que l’utilisation de la biopile constitue un avantage. La simulation actuelle est un regroupement de plusieurs conditions, tant techniques qu’économiques, qui se prêtent à l’acquisition d’informations. À première vue, l’identification de pareilles conditions, sans utiliser de modèle technico-économique pour générer une stratégie optimale de restauration, n’est pas possible.

Selon le résultat suite à l’acquisition d’informations, si la situation réelle est légère, la restauration est arrêtée au début de la deuxième année sans qu’il n’y ait traitement durant celle-ci mais après un déboursé pour connaître cette situation (scénario 14). Si la situation réelle est extrême, puisque la bioventilation *in situ* ne peut assurer avec assez de certitude l’atteinte en deux ans de la situation légère, le traitement en biopile est utilisé pour les deux prochaines années sans qu’il n’y ait de reconsidération du choix entre la deuxième et la troisième année (scénario 19). Si la situation réelle est modérée, la bioventilation *in situ* est retenue en raison de ses faibles coûts de traitement et de son potentiel non négligeable d’atteindre la situation légère au cours des deux prochaines années (scénarios 15, 16, 17 et 18).

Si la bioventilation *in situ* avec acquisition d’informations a été retenue pour la deuxième année, et qu’à la fin de celle-ci la probabilité la plus grande de l’état du site est associée à la situation modérée, la bioventilation *in situ* est encore une fois appliquée sur le site pour une dernière année (en raison de la limitation à trois années de traitement). Même si la biopile peut être utilisée dans ce cas-ci en raison de la concentration moyenne (927 mg/kg) sous la limite de 3 600 mg/kg, les économies de coûts de traitement par la bioventilation *in situ* compensent pour le risque (16,2 %) de ne pas atteindre cette situation comparativement aux coûts importants nécessaires en biopile pour s’assurer d’atteindre cette situation. Ce choix mène vers les scénarios 16, 17 et 18.

Pour ce qui est de l’utilisation de la bioventilation *in situ* lors de la deuxième année de traitement et appliquée à un état dont la situation la plus probable est la modérée, une troisième année n’est pas nécessaire si l’état du site en fin de cette deuxième année est caractérisé par la situation légère comme étant la plus probable (scénarios 3, 4, 9, et 10). Si, par contre, la situation la plus probable à la fin de la deuxième année est la modérée, un traitement d’une année supplémentaire est permis et nécessaire. Pour les mêmes raisons qu’évoquées dans le cas de la troisième année de traitement lorsqu’il y a eu acquisition d’informations en deuxième année, la bioventilation est économiquement préférable à la biopile et ce, sans acquisition d’information (scénarios 11, 12 et 13).

L’intérêt de cette simulation est d’avoir démontré par un exemple, l’utilité du modèle à identifier différents choix selon le niveau de certitude de l’état du site, l’efficacité d’atteindre la situation légère en fin de traitement et la valeur de cette situation. Contrairement aux simulations précédentes, dont les SOR étaient toutes construites sur l’utilisation d’une seule technologie tout au long de la restauration, la SOR de cette simulation est basée sur une utilisation séquentielle de plusieurs technologies. Devant la complexité d’une telle SOR pour une restauration relativement

simple (peu de technologies possibles et seulement trois situations possibles), la nécessité d'utiliser un modèle tel METEORS pour définir une stratégie de restauration prend tout son sens.

La valeur de la SOR ainsi développée est de 1 387 169 € avec une durée moyenne de 2,84 années et un indice de risque de 29,6 %. Les cinq scénarios les plus probables totalisent 96,7 % d'occurrence. La valeur du scénario le plus probable (45,3 %) est de 1 605 500 € et a une durée réelle de 3 ans. Les premier (45,3 %), deuxième (22,1 %), troisième (14,8 %) et cinquième (5,3 %) scénarios les plus probables sont associés à une situation légère tandis que le quatrième scénario le plus probable (9,2 %) est associé à une situation modérée. Aucun scénario n'est associé à une situation extrême puisque le traitement en biopile est utilisé dans le cas de la plus forte contamination en seconde année, éliminant ainsi, par son efficacité de 100 % à atteindre la situation légère, toute possibilité de demeurer dans une situation extrême. Le scénario ayant la plus grande probabilité d'occurrence est représenté sur la Figure 8 par le chemin en trait gras.

Dans cette simulation, la valeur d'option théorique en début de seconde année de traitement pour l'état du site dont la situation la plus probable est extrême (seul cas où l'acquisition d'informations est avantageuse) est de 39 459 € tandis que les coûts d'acquisition d'informations sont de 31 522 € (en valeur absolue). Ces coûts étant moindres que la valeur d'option théorique, l'acquisition d'informations est souhaitable dans ce cas, entraînant une valeur d'option réelle de 7 937 €.

La valeur d'une stratégie n'est pas la valeur que touchera un gestionnaire pour la restauration du site, mais plutôt la moyenne pondérée des valeurs des scénarios la composant. En appliquant cette stratégie, un des scénarios se réalisera et le gestionnaire touchera la valeur réelle de ce scénario. La Figure 9 présente les caractéristiques (valeurs réelles et probabilités d'occurrence) des scénarios composant la stratégie optimale. Plus la surface d'un cercle est importante, plus sa probabilité d'occurrence est élevée. Les identifications (l'abréviation SOP signifiant *scénario de la stratégie optimale*) des scénarios correspondent à celles de la discussion ci-haut et de la Figure 8.

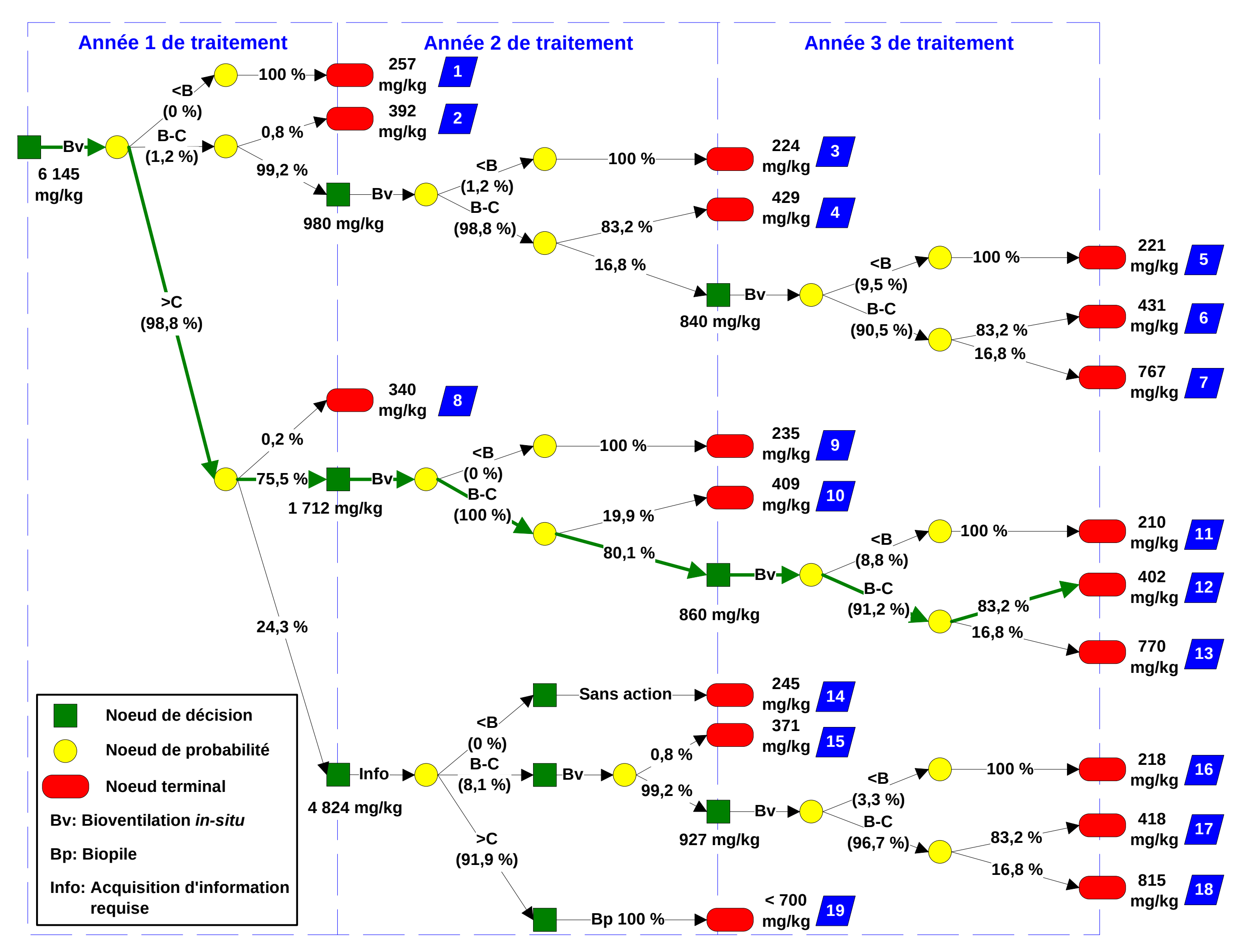


Figure 8- Stratégie optimale de restauration, valeur d'un projet, durée limitée à trois ans

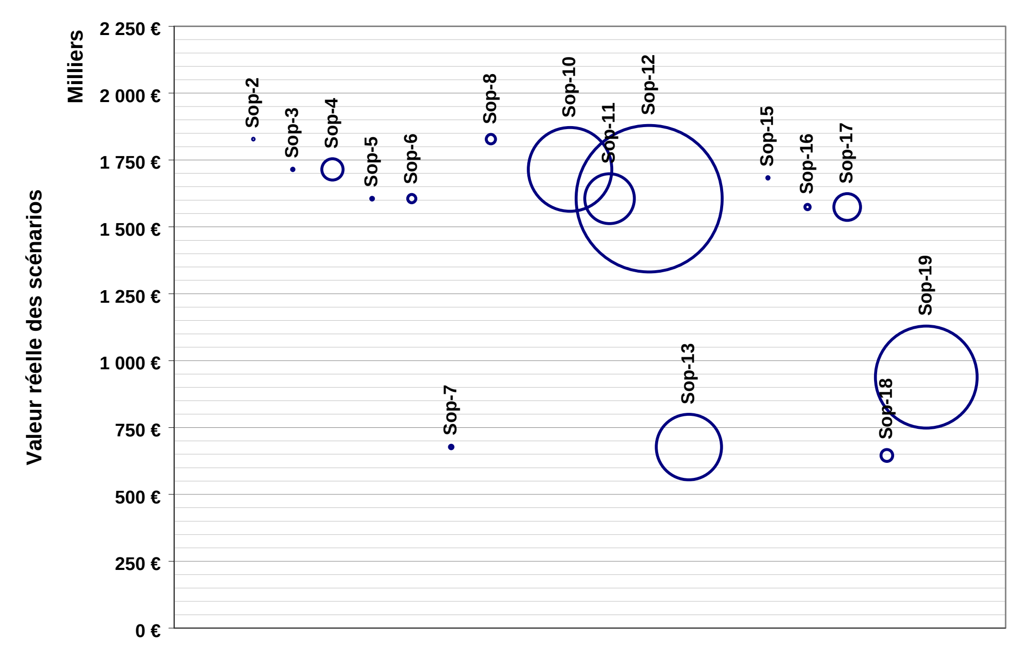


Figure 9- Caractéristiques des scénarios composant la stratégie optimale, valeur d'un projet, restauration limitée à 3 ans

5.5.2.4 <u>Durée maximale de 4 ans</u>

Les simulations contraintes à une durée maximale de restauration de quatre ans sont les dernières présentées dans cette section. En effet, les résultats de simulations limitées à cinq années de traitement sont similaires à ceux présentés ci-après.

5.5.2.4.1 Valeur marchande du site

À partir de la quatrième année de traitement, une modification majeure vient changer l'évolution de la SVM. Le Tableau 5 présente une évolution des valeurs marchandes du site restauré jusqu'à la situation modérée et les coûts de traitement par bioventilation *in situ* selon la durée du traitement. Le passage entre la troisième et la quatrième année de traitement est marqué par le transfert d'une valeur positive à une valeur négative. Ainsi, tous les scénarios se terminant sur la situation modérée, soit les scénarios non complétés à la fin de la quatrième année (autres que ceux dont la concentration reste dans la situation extrême) ont une valeur réelle négative. Au lieu d'avoir comme précédemment au maximum un seul scénario dont la valeur est négative (celui dont la situation finale est extrême), la restriction de la restauration en quatre années fait apparaître dans la stratégie optimale un groupe de scénarios dont la valeur est négative.

En raison de la valeur marchande du site, lorsque restauré jusqu'à la situation légère, inférieure aux coûts du traitement en biopile pour toutes les décisions prises lors de la quatrième année de la restauration, le traitement par bioventilation *in situ* est toujours préféré à celui en biopile pour la stratégie optimale. L'acquisition d'informations n'est pas avantageuse en raison d'une valeur d'option théorique trop faible par rapport aux coûts d'acquisition d'informations et ce, à chaque année de traitement et pour chaque cas de figure. Le cas le plus contaminé lors de la quatrième année de traitement nécessiterait, pour un traitement en biopile, deux années de restauration, soit une de plus que la contrainte. C'est pour cette raison que le traitement en biopile ne peut pas être

appliqué lors de cette dernière année pour les états de site dont la concentration en contaminant dans le sol est supérieure à la limite de 3 600 mg diesel / kg sol. La stratégie optimale, basée sur une utilisation exclusive de la bioventilation sans acquisition d'information, a une durée pondérée de 3,11 années, tandis que le scénario le plus probable a une durée réelle de 3 ans. La valeur de la SOP est de 301 136 €, son indice de risque est de 54,62 % et elle est composée de 45 scénarios, dont 9 à valeur négative (8 associés à une situation modérée et 1 à une situation extrême). La Figure 10 permet d'observer l'apparition des scénarios de valeurs négatives pour la SVM limitée à quatre années comparativement à la SVM limitée à trois années. Le scénario le plus probable (45,3 %) a une valeur réelle de 325 349 € et une durée réelle de 3 ans. Les cinq scénarios les plus probables totalisent 81,6 % des chances et sont tous associés à une situation légère. Bien que la stratégie soit composée de scénarios à valeur négative, les chances qu'un de ces scénarios indésirables se produise sont de 6,2 %. De tous les scénarios à valeur négative, celui ayant la plus grande probabilité d'occurrence n'a que 2,1 % des chances de se produire, entraînant des pertes totales de 15 686 €. Le choix de suivre cette SOP repose sur l'attitude du décideur non seulement à courir le risque de conserver un site de situation extrême, mais également d'atteindre un site de situation modérée.

Tableau 5- Variation de la valeur de la restauration pour la SVM, situation modérée (valeurs actualisées)

Durée du traitement (années)	1	2	3	4	5
Valeur du site (Situation légère)	313 403 €	298 747 €	288 644 €	278 884 €	269 452 €
Coûts cumulatifs de la bioventilation	162 153 €	207 819 €	251 940 €	294 570 €	335 758 €
Valeur de la restauration	151 250 €	90 928 €	36 705 €	**-15 686 €**	**-66 305 €**

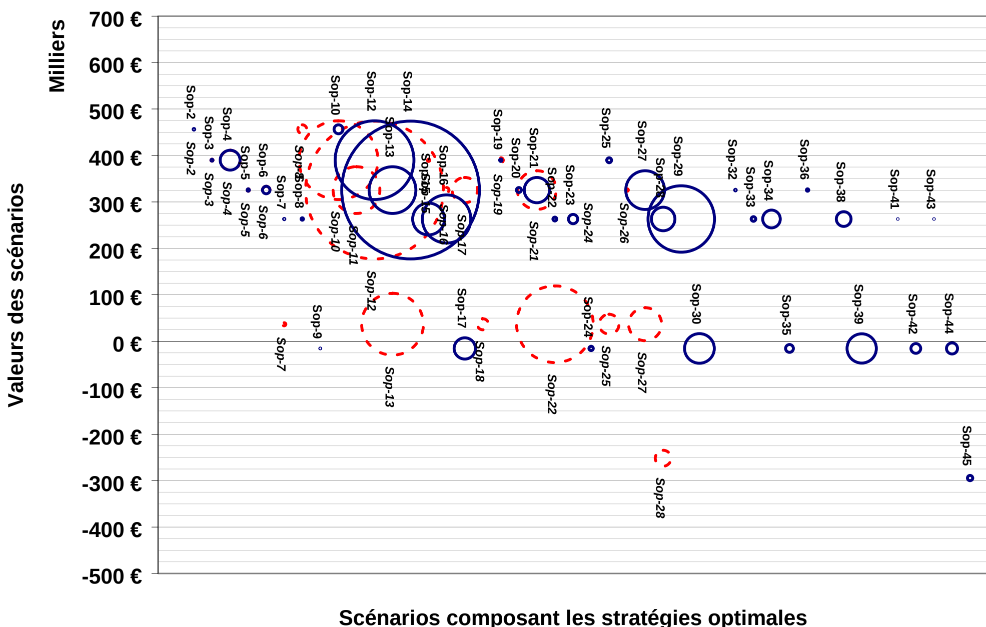


Figure 10- Différences entre les SVM limitées à 3 et 4 années, apparition de scénarios négatifs

5.5.2.4.2 Valeur d'un projet

La résolution du modèle METEORS se faisant à rebours, de la dernière année de traitement à la première, les différentes situations du site en début de quatrième année de restauration vont dicter comment la restauration va se terminer. Pour les situations légères, aucun traitement ne sera nécessaire durant l'année quatre. Or, pour les situations modérées, dont la concentration moyenne en début de quatrième année est supérieure à 1 000 mg/kg, l'efficacité de la bioventilation *in situ* à atteindre la situation légère est faible (20,6 %), en raison des plages de valeurs établies pour l'évaluation de la performance de cette technologie (voir Annexe 1). Pour ce scénario, le recours à la biopile est techniquement recommandé (en raison de la certitude d'atteindre la situation légère) et économiquement rentable (en raison des bénéfices élevés de la valeur d'un projet comparativement aux coûts de traitement en biopile). Si, par contre, la situation du site est extrême au début de la quatrième année de restauration, la biopile ne peut être utilisée en raison de la durée totale requise par cette technologie pour atteindre la situation légère à partir d'une concentration moyenne supérieure à 3 600 mg/kg. Dans ce cas, bien que techniquement la bioventilation *in situ* ne soit pas efficace pour atteindre la situation légère (0,6 %, comparativement à 80,1 % d'atteindre la situation modérée et 19,3 % de rester dans la situation extrême), cette technologie est la seule qui puisse être utilisée. Par contre, son usage entraîne l'apparition de scénarios à valeur faible (associés à la situation modérée) et à valeur négative (associés à la situation extrême). Pour les autres cas de situations modérées, mais dont la concentration moyenne est inférieure à 1 000 mg/kg au début de la quatrième année, l'utilisation de la bioventilation *in situ* est techniquement et économiquement rentable.

Par ces choix de technologies, les valeurs des situations en fin de troisième année sont haussées par rapport à ces mêmes situations dans la SVP limitée à trois années de traitement. Ainsi, le rejet de l'utilisation de la bioventilation *in situ*, pour la situation extrême dans la SVP limitée à trois ans, ne s'applique pas à cette simulation limitée à quatre années puisque la valeur de cette

situation extrême est plus élevée (en raison de la possibilité de poursuivre le traitement une année de plus et ainsi courir la chance de diminuer la concentration dans la situation modérée ou même légère). Ceci implique que pour la troisième année, la bioventilation *in situ* est la technologie à utiliser peu importe l'état du site et ce, sans acquisition d'information. Pour la première et la seconde année de traitement, la bioventilation *in situ* sans acquisition d'information compose également la SOR.

La stratégie optimale se résume donc en une utilisation sans acquisition d'information de la bioventilation durant les trois premières années de la restauration. Par la suite, si une quatrième année est nécessaire, la bioventilation est utilisée (toujours sans acquisition d'information) si la contamination moyenne est comprise entre 700 et 1 000 mg diesel / kg sol ou supérieure à 3 500 mg diesel / kg sol. Pour une concentration entre 1 000 et 3 500 mg diesel / kg sol, le traitement en biopile est favorisé. La durée pondérée de la stratégie optimale est de 3,11 années et la durée du scénario le plus probable est de 3 ans. La valeur de la SOR est de 1 539 830 € avec un indice de risque de 30,8 %. La valeur réelle du scénario le plus probable (45,3 %) est de 1 605 500 € avec une durée de 3 ans. Les cinq scénarios les plus probables totalisent 81,6 % des chances d'occurrence de cette SOR. Le seul scénario à valeur négative (associé à la situation finale extrême en raison de l'utilisation de bioventilation *in situ* lors de la dernière année pour l'état dont la probabilité la plus grande était en relation avec la situation extrême) a une probabilité d'occurrence aussi faible que 0,08 % et une valeur de - 294 570 €.

5.6 Résumé de l'ensemble des simulations

Dans le but de permette une compréhension du potentiel à développer des stratégies de restauration respectant différentes contraintes techniques, économiques et temporelles, par l'entremise du modèle METEORS, la présente section se veut un résumé de l'ensemble des simulations présentées précédemment. Les résultats sont regroupés selon deux caractères propres aux simulations : l'indice de risque et les probabilités d'atteinte les différentes situations finales du site.

Les résultats résumés dans cette section incluent également les simulations (SVM et SVP) limitées à cinq années de traitement qui n'ont pas été présentées en détails dans ce rapport parce que les résultats qui en découlaient étaient de même nature que ceux des simulations limitées à quatre années.

5.6.1 Indice de risque

L'indice de risque a été défini pour représenter l'étalement des valeurs des scénarios autour de la valeur de la stratégie de restauration. Plus cet indice est faible, plus la valeur réelle du scénario qui se réalisera à l'application de la stratégie sera similaire à la valeur de cette dernière.

La Figure 11 présente l'évolution de l'indice de risque pour les SVM. L'indice, très important lorsque la contrainte temporelle est grande, diminue très rapidement pour atteindre un plateau d'environ 50 % vers la simulation limitée à quatre années de traitement. Il faut se rappeler ici que toutes les SOR de ces simulations sont basées sur la même structure, soit l'utilisation à chaque année de la bioventilation *in situ* sans acquisition d'information. En associant ce début de plateau, dans l'indice de risque à la limitation de la quatrième année de traitement, à un début de plateau dans la valeur de la stratégie optimale de restauration pour cette même limitation (voir Figure 12), et à un début de plateau dans la durée de la stratégie optimale de restauration (voir Figure 13), la recommandation suivante de restauration peut être établie :

> *Dans le cas d'une composition similaire des stratégies optimales de restauration peu importe leurs contraintes temporelles, il existe une contrainte optimale dans la durée maximale de traitement qui se situe autour*

de la durée moyenne de la stratégie optimale de restauration non limitée dans le temps.

Au-delà de cette contrainte optimale, le gain en réduction de l'indice de risque, de même que le gain dans la valeur de la SOR, ne justifient pas le besoin d'une année supplémentaire de traitement, surtout lorsque l'on considère qu'à partir de la troisième année de contrainte temporelle, la valeur du scénario le plus probable est constante et positive.

Cette recommandation n'est valide que dans un contexte de grand écart entre les coûts de traitement de deux technologies et que la valeur du site restauré est comprise entre ces coûts (en valeur absolue) de restauration. Pour ainsi dire, la recommandation ne peut être considérée que lorsque la SOR est composée de la même technologie, peu importe la contrainte temporelle.

En effet, lorsque différentes variantes font intervenir des technologies différentes dans une SOR, d'une contrainte temporelle à une autre, comme c'est le cas dans les SVP, la décroissance de l'indice de risque vers un plateau, telle qu'observée précédemment, n'a pas lieu. Sur la Figure 14, l'indice du risque passe de maximum à nul, de la contrainte de une année, à celle de deux ans. En effet, la SOR contrainte à deux ans nécessite l'utilisation, dès la première année, de la biopile, technologie certaine. Par la suite, l'indice de risque en troisième année de contrainte reste légèrement inférieur à celui de la quatrième année de contrainte, en raison de l'acquisition d'information dans 6 des 19 scénarios de la stratégie optimale. L'indice de risques des simulations suivantes, contraintes à 4 et 5 années et non contraintes, augmente légèrement pour ensuite décroître, passant de 30,8 % à 23,7 %. Par contre, toutes ces simulations suivent la même progression que les simulations par la SVM pour la valeur (voir Figure 15) et la durée de la SOR, de même que pour la durée du scénario le plus probable.

Une recommandation, telle que celle faite précédemment, n'est pas aussi simple à formuler dans ce cas. Ainsi, puisque, à l'exception de la simulation contrainte à une seule année de traitement, les indices de risques sont relativement faibles et les valeurs des stratégies optimales sont positives et croissantes avec la diminution de la contrainte de temps, le choix de la durée optimale de restauration dépend de la valeur finale de la restauration attendue du gestionnaire de site. Si ce dernier privilégie la plus grande valeur possible, la durée optimale de la restauration va tendre vers la durée moyenne de la simulation optimale sans contrainte temporelle. Si, à l'opposé, l'objectif du gestionnaire est de s'assurer d'une restauration à faible risque d'échec, la durée optimale de la restauration sera la première donnant un indice de risque acceptable (deux années dans les simulations présentées dans ce rapport, puisque l'indice est nul).

Lorsque la combinaison de plusieurs technologies permet de diminuer rapidement le risque associé à une restauration, la durée optimale de cette dernière va dépendre de l'objectif du gestionnaire dans la décontamination du site. Si l'objectif est d'obtenir la plus grande valeur de stratégie possible, la durée optimale de la restauration sera autour de la durée moyenne de la stratégie optimale sans contrainte temporelle. Si, à l'opposé, l'objectif est simplement d'appliquer une stratégie à faible risque, la durée optimale sera celle de la première stratégie ayant un indice de risque raisonnable pour le gestionnaire.

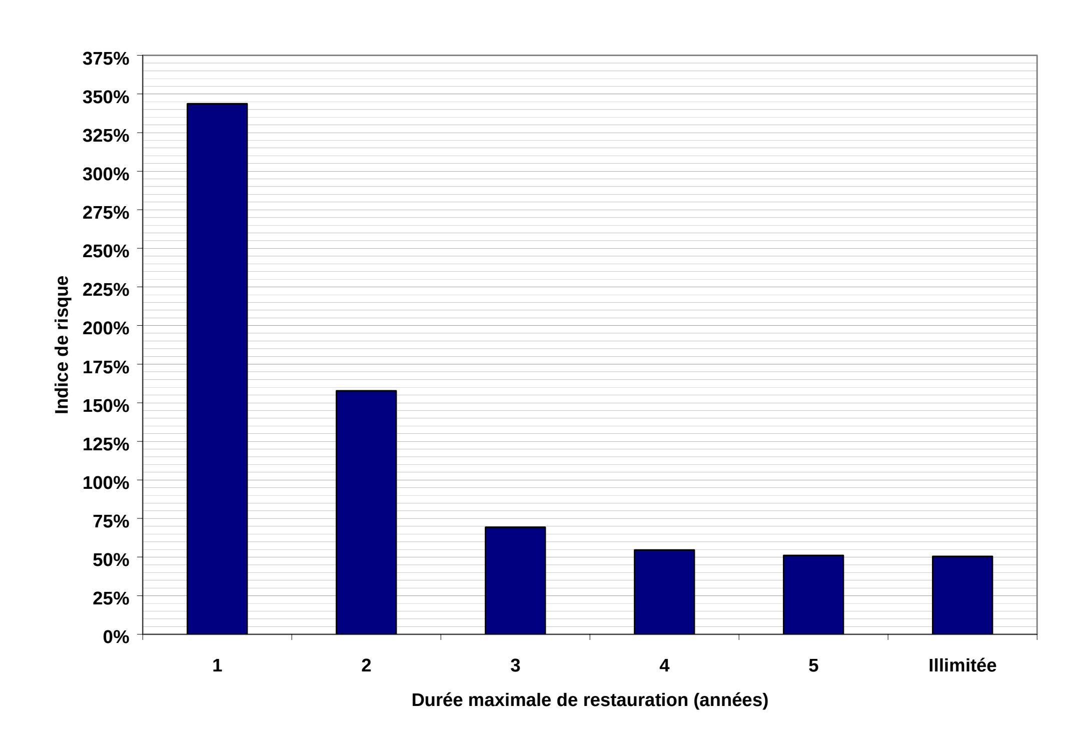


Figure 11- Indice de risque, simulations par la valeur marchande d'un site

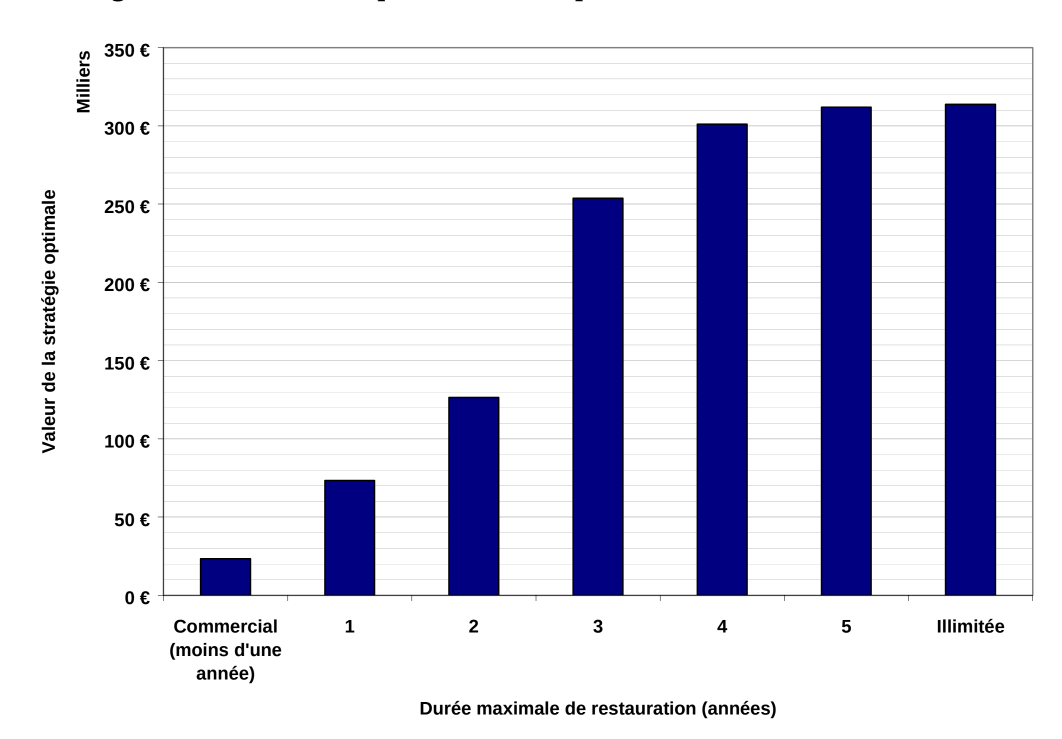


Figure 12- Évolution de la valeur de la stratégie optimale de restauration, simulations par la valeur marchande d'un site

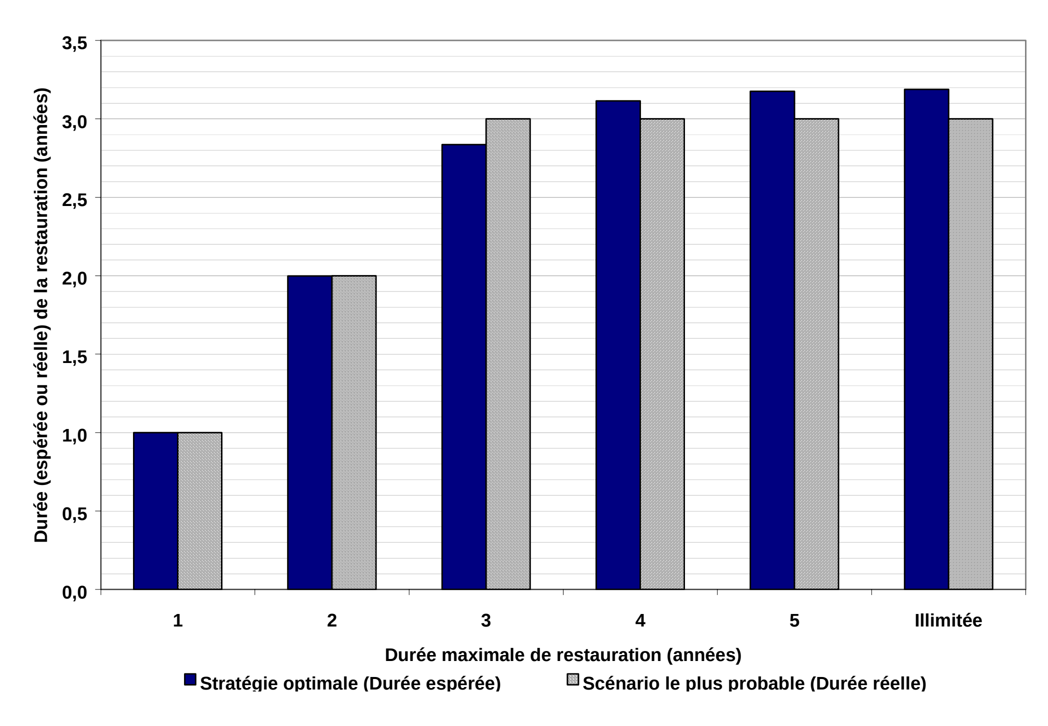


Figure 13- Évolution de la durée de la stratégie optimale et du scénario le plus probable, simulations par la valeur marchande du site

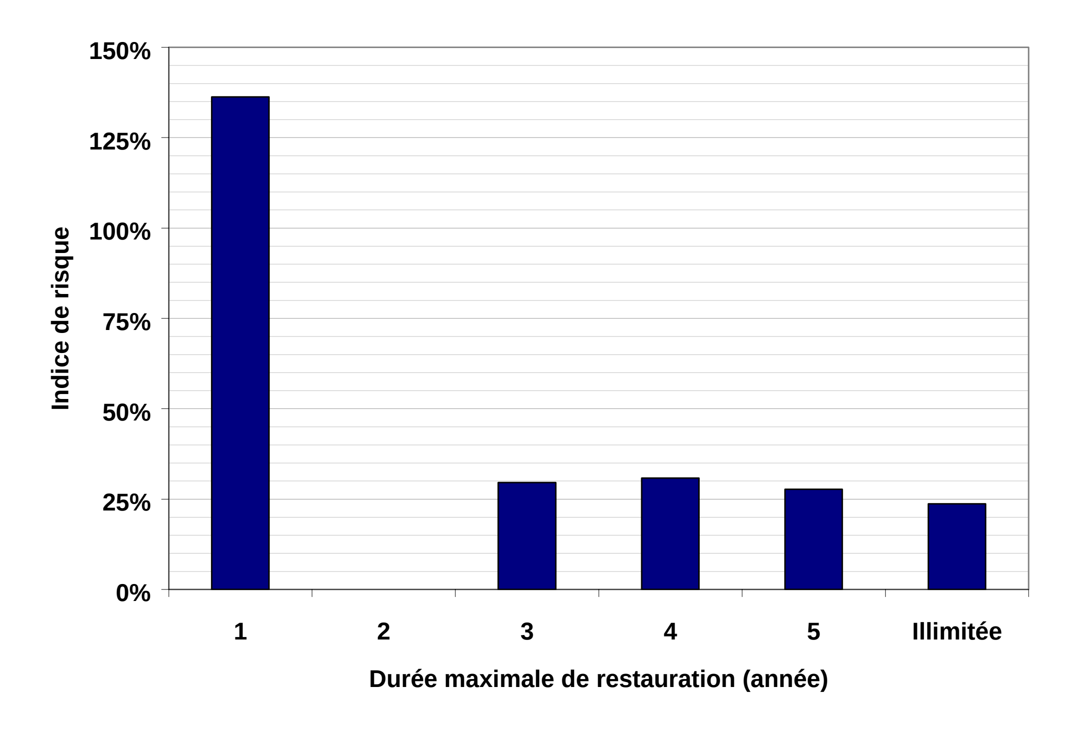


Figure 14- Indice de risque, simulations par la valeur d'un projet

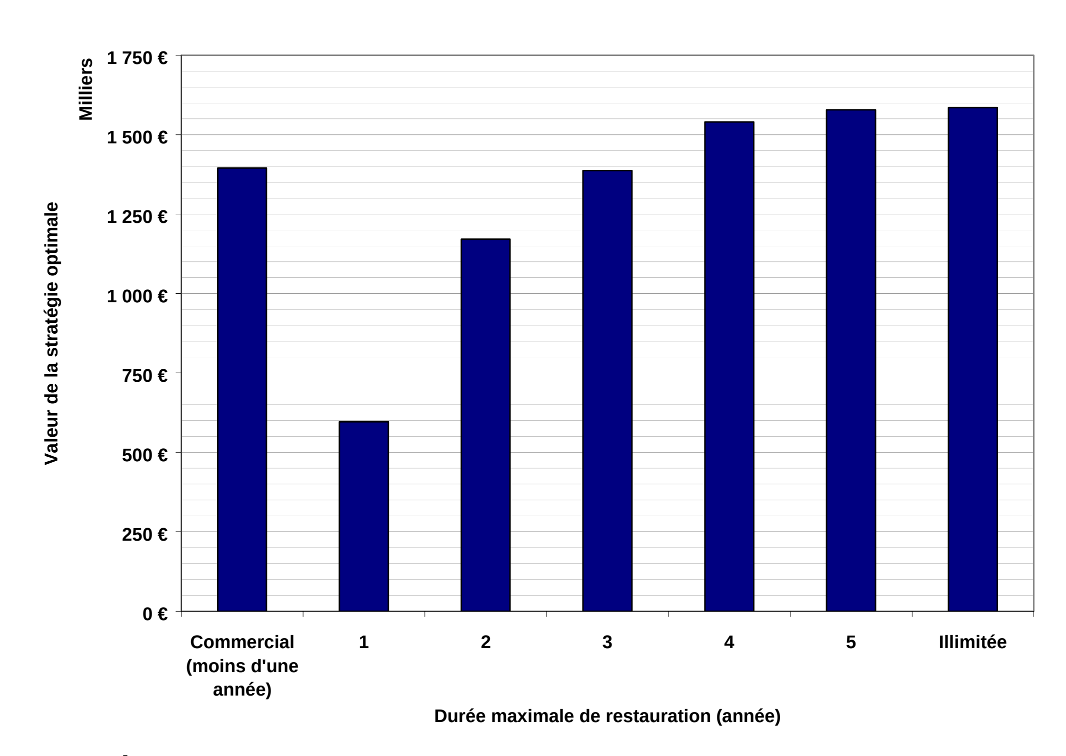


Figure 15- Évolution de la valeur de la stratégie optimale de restauration, simulations par la valeur d'un projet

Les Figure 12 et Figure 15 indiquent, à titre informatif, la valeur d'une stratégie basée sur l'utilisation d'un traitement commercial par biopile, c'est-à-dire un traitement qui aurait lieu dans un centre de traitement de sols contaminés, opéré de façon commerciale par une firme privée. Les coûts de traitements pour un gestionnaire seraient, dans ce cas, associés à l'excavation et au transport du sol jusqu'au centre, de même qu'aux frais de traitement établis par la firme. Ces coûts ont été établis, pour la présente étude, par le biais d'une entrevue téléphonique avec une firme spécialisée en traitement des sols en biopile, située au Québec. À la Figure 12, la valeur du site restauré est pratiquement similaire aux coûts de traitement commercial, expliquant ainsi la faible valeur de cette stratégie. Dans ce cas, le recours à un traitement dans un centre de restauration pourrait être justifié par la nécessité de traiter le site en quelques semaines (pour des questions de risque à la santé humaine, par exemple). Si la valeur du site est beaucoup plus élevée, Figure 15, le traitement commercial est d'une rentabilité s'approchant de celle des stratégies de longues durées, développées lors des simulations.

5.6.2 Probabilités d'occurrence des situations finales

Les deux recommandations précédentes ont fait référence à des contraintes optimales dans la durée maximale de la restauration, signifiant qu'il n'est pas nécessaire de recourir à des restauration de durée maximale très longue, selon que l'objectif du gestionnaire et le contexte dans lequel la restauration a lieu (coûts des technologies, valeurs finales des situations, soient les compositions des stratégies optimales).

Cette partie exprime dans un langage différent de celui de l'indice de risque, les chances de succès d'atteindre les objectifs de restauration pour les différentes stratégies.

Les Figure 16 et Figure 17 présentent l'évolution des probabilités cumulatives des occurrences de toutes les situations finales des stratégies optimales. À la Figure 16, la distribution de toutes les situations finales se déplace de plus en plus vers la gauche (vers la situation légère), au fur et à

mesure que la contrainte temporelle diminue. À l'instar de la seconde recommandation, les contraintes de deux années et plus permettent d'assurer l'atteinte de la situation légère à plus de 90 % (voir Figure 17).

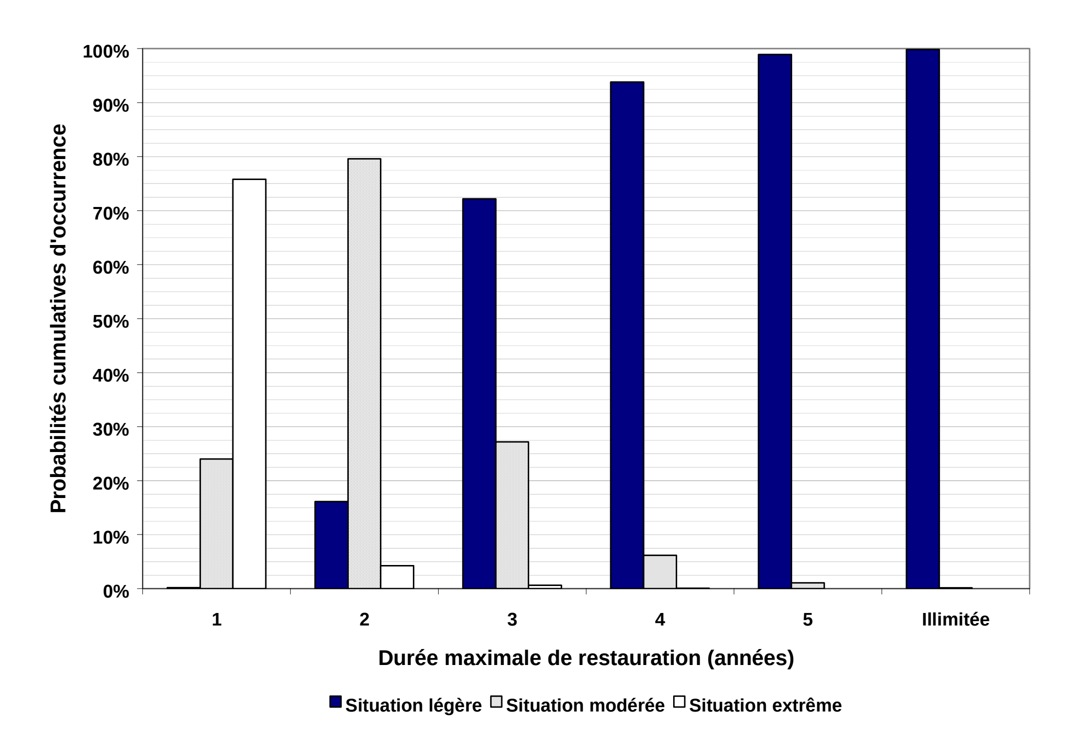


Figure 16- Évolution des probabilités d'occurrence des situations, SVM

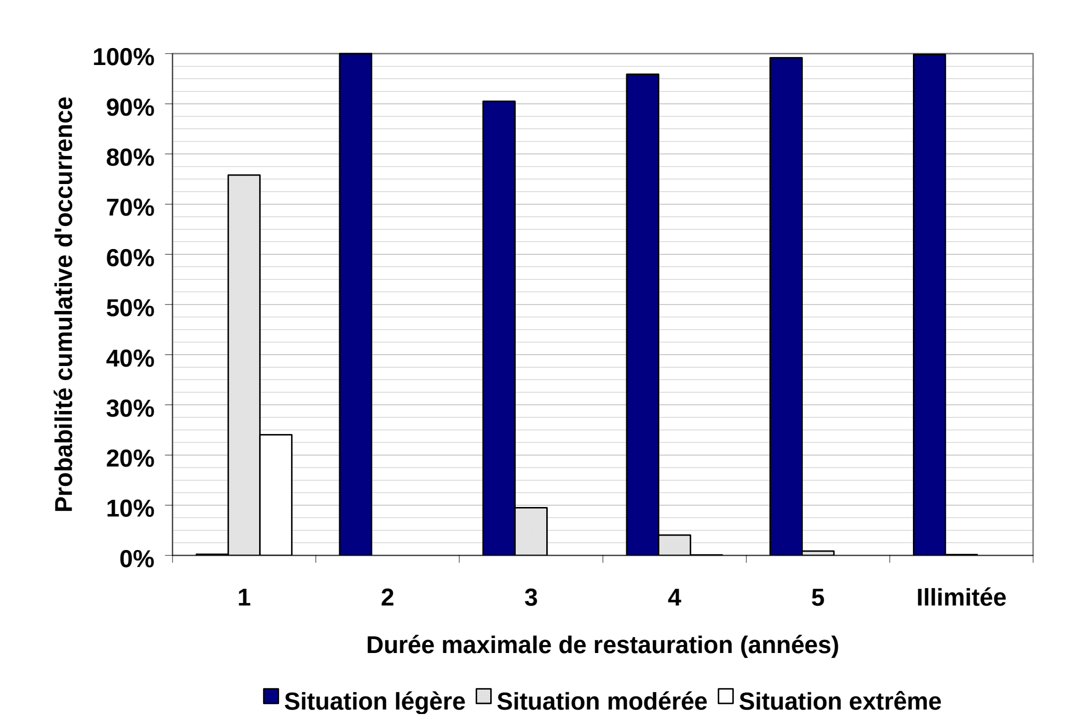


Figure 17- Évolution des probabilités d'occurrence des situations, SVP

Ces recommandations sont fondées sur deux séries de simulations réalisées par le modèle METEORS. Tant et aussi longtemps que d'autres simulations plus complexes n'auront pas été réalisées et interprétées, ces recommandations doivent être considérées avec prudence. Elles doivent être interprétées comme des recommandations adressées à un gestionnaire de sites faisant face à une problématique similaire à celle présentée dans ce rapport et voulant savoir quelle approche il doit utiliser pour restaurer son site, à savoir, s'il doit favoriser une restauration rapide ou lente selon ses attentes.

Ces recommandations, quant à la durée optimale de la restauration, interviennent dans un contexte où la durée de la restauration est contrainte par le gestionnaire et non par un facteur extérieur (risque à la santé humaine, risque à l'environnement, etc.). Aussi, si la restauration est contrainte temporellement par un facteur externe, une seule simulation devient nécessaire.

6 Vers un véritable outil de gestion et de simulation des sites contaminés

Ce dernier chapitre du rapport précédant la conclusion se veut un retour sur le travail accompli jusqu'à présent dans le développement d'un outil de gestion intégrant les risques économiques pour la réhabilitation des sites contaminés, et un aperçu des étapes ultérieures à franchir dans le but d'obtenir un véritable outil de gestion informatisé.

Au cours de la dernière année, la Chaire a démontré, par les simulations réalisées dans ce rapport, que le modèle technico-économique METEORS intègre efficacement les notions de génie de l'environnement (incertitude des niveaux de concentrations, efficacité des technologies, dimensionnement de ces dernières) et d'économie (analyses coûts-bénéfices, options réelles, irréversibilité des décisions, acquisition d'informations) dans le but de générer une stratégie de restauration adaptée à un site contaminé et à différentes contraintes techniques, économiques et temporelles.

Parallèlement à ce développement et à la mise à l'essai du modèle sur des sites hypothétiques, les paramètres critiques de cinq (5) technologies affectant directement leur efficacité à décontaminer un site ont été identifiés de même que leur plage de valeurs allant d'un extrême à un autre. Cette documentation technique a également permis d'identifier les éléments entrant dans le calcul des coûts de traitement. Ceci a directement amené à la construction de bases de données économiques associées à ces technologies. Ces bases de données sont toutes construites selon la même forme, séparant les différentes étapes d'un processus de restauration, et pour chaque étape, différentiant les coûts fixes des coûts variables.

Finalement, une méthode de simulation des concentrations et des probabilités d'occurrence des situations d'un site a été retenue, il s'agit d'une simulation géostatistique basée sur le krigeage des concentrations et la génération aléatoire de concentrations respectant le variogramme des concentrations connues.

Les différentes simulations de restauration de sites contaminés réalisées dans le cadre de ce projet et d'un projet doctoral ont permis d'identifier différents ajustements qui pourraient faire l'objet de travaux futurs. Sans ces ajustements, un outil de gestion des sites contaminés aurait toute sa raison d'être et son potentiel d'utilisation. Toutefois, avec ces ajustements, le nouvel outil serait davantage flexible et applicable à toutes sortes de sites et de contraintes. Parmi ces ajustements, la possibilité d'acquérir de l'information d'un niveau de certitude moins élevé, et à moindre coût, permettrait de diminuer le degré d'incertitude face à l'état d'un site sans pour autant augmenter les coûts de façon considérable.

Par ailleurs, pour que l'outil de gestion développé ici passe du stade de concept éprouvé à celui d'interface utilisable par un gestionnaire, les étapes suivantes devraient être réalisées (il est à noter que cette liste n'est pas exhaustive) :

- Automatiser la résolution du modèle technico-économique; ceci doit se faire par la création des scénarios de traitement et la résolution optimale de ces scénarios.
- Incorporer dans cette automatisation la lecture et l'écriture des différentes bases de données développées dans un esprit de soutien au modèle.
- Développer un sous-programme informatisé pour automatiser la conception des systèmes de traitement associés à chaque technologie considérée, selon les contraintes techniques du site à l'étude, mais aussi selon d'autres contraintes éventuelles liées au projet (contraintes législatives, budgétaires, administratives, etc.).
- Intégrer les bases de données économiques au sous-programme.
- Mettre en place une interface conviviale pour piloter le modèle.

- Augmenter le nombre de technologies pouvant faire l’objet d’une étude par l’outil de gestion et, par le fait même, le nombre de technologies pouvant entrer directement en compétition lors de la prise de décision.
- Développer davantage les bases de données économiques pour ces nouvelles technologies.
- Diversifier économiquement et techniquement les modes d’acquisition d’informations, permettant ainsi d’avoir la possibilité d’acquérir de l’information de plus faible certitude, mais à meilleur coût.
- Étudier les différents besoins des gestionnaires de sites afin d’identifier les types de réponses ainsi que leurs formes.
- Mettre en place un système de traitement des résultats des simulations pour générer ces types de réponses.
- Introduire un processus de remise en question des résultats obtenus afin de faire valider les réponses obtenues par le gestionnaire lui-même.

Conclusion

L'objectif de ce projet était de développer les bases d'un logiciel (SITE VII) permettant une approche globale et rigoureuse de comparaison de scénarios de restauration de sites contaminés aux hydrocarbures pétroliers. L'atteinte de cet objectif a été réalisée notamment par le raffinement du modèle technico-économique qui est au cœur du logiciel SITE VII. Parallèlement, les bases de données économiques des éléments unitaires nécessaires pour les cinq technologies considérées ont été développées. Ces technologies sont : la bioventilation *in situ*, le traitement en biopile (biotertre), la bioaspiration *in situ*, le biobarbotage et la désorption thermique. Dans une version ultérieure du logiciel, ces bases de données unitaires seront utilisées pour créer des bases de données économiques temporaires selon les besoins et les nécessités des technologies considérées.

Une grande partie de ce projet a porté sur la conception d'une structure de décision et de traitement de l'information (provenant du site, des bases de données économiques, des conceptions des technologies et de l'évaluation de l'efficacité des technologies) sur laquelle le logiciel SITE VII reposera.

Une série de simulations de la restauration d'un site virtuel contaminé au diesel a été effectuée à partir des données de ce site et des bases de données économiques pour la bioventilation *in situ* et la biopile. Des contraintes de temps (durée maximale permise pour la restauration) et économiques (valeur des bénéfices associés au site) ont été utilisées dans les simulations pour premièrement, observer le comportement du modèle face à différentes restrictions et deuxièmement, analyser les stratégies de restauration identifiées par le modèle selon ces contraintes et ainsi tirer des conclusions face à l'utilité du logiciel SITE VII pour des gestionnaires de sites contaminés. En plus de la réponse principale du logiciel et ses réponses secondaires, soit la stratégie optimale de restauration et la composition de cette dernière (scénarios et leurs probabilités d'occurrence), deux paramètres sont utilisés pour comparer différentes simulations entres elles et ainsi identifier les contraintes optimales pour la restauration d'un site donné. Ces paramètres sont : la valeur de la stratégie optimale de restauration et l'indice de risque, représentant l'étalement des valeurs des scénarios autour de la valeur de la stratégie qu'ils composent.

La réalisation de ce projet a permis de démontrer la solidité du concept à la base du logiciel SITE VII ainsi que la nécessité d'un tel outil de gestion pour surmonter la complexité associée à la sélection optimale d'une technologie de restauration d'un site.

La réalisation d'un logiciel complet de gestion des sites contaminés passe inévitablement par l'augmentation du nombre de technologies considérées (plus le logiciel considérera de technologies, plus la stratégie qu'il identifiera sera précise face l'atteinte des objectifs de restauration), l'ajout de différentes sources d'acquisition d'informations supplémentaires (informations certaines et incertaines) et l'ajout d'un module de traitement des réponses pour que l'utilisateur interprète adéquatement les résultats des simulations.

Référence

Arrow, K. J., and Fisher, A. C. (1974). “Environmental preservation, uncertainty, and irreversibility.” *Quarterly Journal of Economics*, 88(May), 312-319.

Bage, G. F., Sinclair-Desgagné, B., and Samson, R. (Soumis 2001-a). “A technico-economic approach for the selection of site remediation strategy- Part A: Theory.” *Environmental Management.*

Bage, G. F., Sinclair-Desgagné, B., and Samson, R. (Soumis 2001-b). “A technico-economic approach for the selection of site remediation strategy- Part B: Model application.” *Environmental Management*.

Dixit, A. K., and Pindyck, R. S. (1994). *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

DuTeaux, S. B. (1996). “A Compendium of Cost Data for Environmental Remediation Technologies.” *LA-UR-96-2205*, Los Alamos National Laboratory od University of California, for U.S. Department of Energy, Office of Science and Technology, Los Alamos , California.

Federal Remediation Technologies Roundtable, Environmental Protection Agency, Department of Defense (U.S. Air Force; U.S. Army; U.S. Navy), Department of Energy, Department of Interior, National Aeronautics and Space Administration, Tennessee Valley Authority, and Coast Guard. (1998). “Guide to Documenting and Managing Cost and Performance Information for Remediation Projects.” *EPA/542/B-98/007*, Federal Remediation Technologies Roundtable.

Forsyth, Margaret (1997). "The Economics of Site Investigation for Groundwater Protection: Sequential Decision Making under Uncertainty" Journal of Environmental Economics and Management,34(1), 1-31.

Michigan Department of Natural Resources. (1994). “Guidance document: Verification of soil remediation.”, Environmental Response Division and Waste Management Division of the Department of Natural Resources,.

Ministère de l'Environnement du Québec. (1999). *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*, Les Publications du Québec, Québec.

Ott, L. (1984). *An introduction to statistical methods and data analysis,* Prindle, Weber & Schmidt, Boston, Massachusetts.

U.S. Environmental Protection Agency. (1995). “Principles and Practices of Bioventing, Volume 2: Bioventing Design.” *EPA/540/R-95/534a*, US EPA, Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati.

Weisbrod, B. A. (1964). “Collective-Consumption Services of Individual-Consumption Goods.” *Quarterly Journal of Economics*, 78, 471-7.

Annexe 1

FICHE TECHNOLOGIQUE

BIOVENTILATION *IN SITU*

Catégorie : Biologique **Type : *In situ***

Description de la technologie

Cette technologie de restauration de la zone vadose découle, à la base, d'une amélioration de la technologie d'extraction des vapeurs dans le sol (Soil Vapors Extraction). Au lieu de favoriser la volatilisation des contaminants dans le sol pour les extraire vers la surface où ils seront traités, la bioventilation *in situ* minimise au maximum la volatilisation au profit d'un apport en oxygène aux microorganismes présents dans le sol afin de favoriser la minéralisation des contaminants par ces derniers (U.S. Environmental Protection Agency 1995b). L'apport en oxygène peut être réalisé soit par une injection ou une extraction de l'air dans le sol. La conception par injection minimise au maximum la volatilisation des contaminants mais ne contrôle pas d'éventuels déplacements de la contamination par migration de la phase gazeuse (Stanin and others 1996). Pour sa part, une conception par extraction peut entraîner une légère volatilisation des contaminations (le degré de volatilisation étant fonction du débit d'extraction) mais réduit au maximum toute migration des phases gazeuses de contaminant en dehors de la zone de traitement. Puisque la conception par extraction canalise tous les gaz extraits du sol (air et contaminants en phase gazeuse, s'il y a lieu), il est possible de traiter (si nécessaire) ces gaz par l'installation d'un système de traitement, tel qu'un filtre au charbon activé ou un biofiltre. L'ajout de nutriments durant le traitement peut être réalisé par l'injection, sous forme liquide, à la surface du sol.

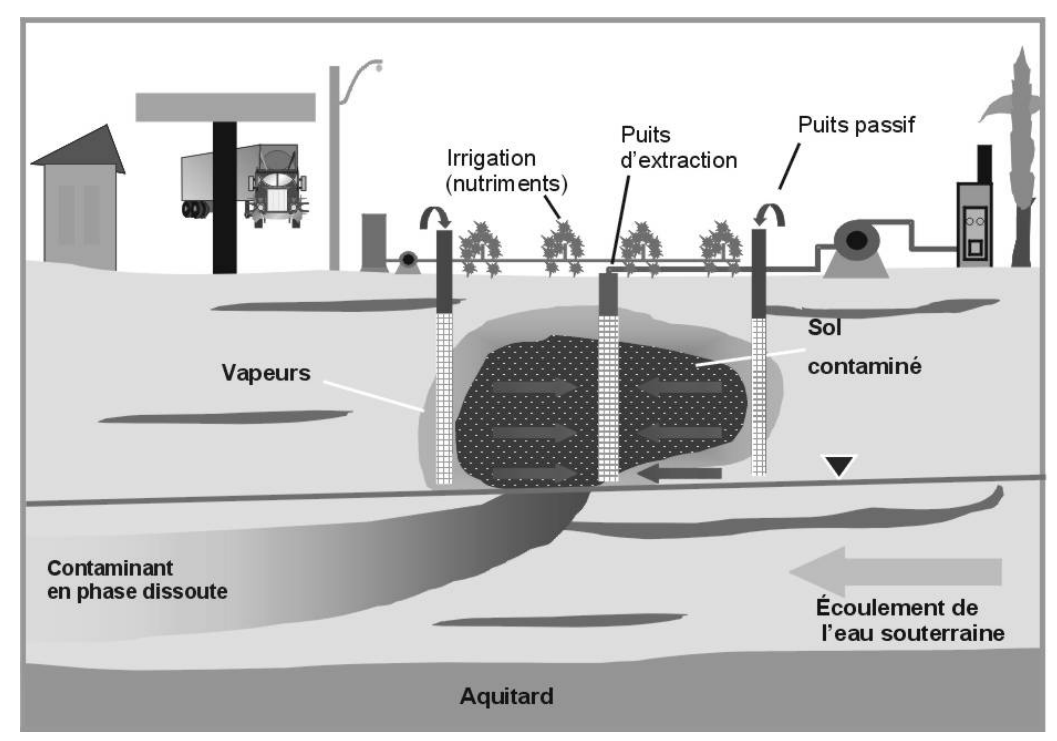


Figure A1-1. Vue schématique d'un système de bioventilation *in situ*

Performance

La performance de la bioventilation in situ repose avant tout sur une conception appropriée pour le site à traiter. Le nombre de puits d'extraction (ou d'injection) ainsi que leur emplacement sur le site sont à la base d'une conception favorisant le maximum de biodégradation des contaminants dans le sol. Des essais de respiration *in situ* de même que des essais de perméabilité du sol à l'air permettent d'estimer le facteur limitant de la biodégradation, soit biologique ou pneumatique, et ainsi de déterminer le rayon d'influence de chaque puits d'extraction (ou d'injection) et, conséquemment, l'espacement entre ces derniers (Johnson and Ettinger 1994). La performance de la bioventilation *in situ* est fonction également d'une série de paramètres biologiques, chimiques et physiques associés au site et aux contaminants (Hinchee 1994, U.S. Environmental Protection Agency 1995a, U.S. Environmental Protection Agency 1995b, U.S. Environmental Protection Agency 1995c, Federal Remediation Technologies Roundtable and others 1998). Plus les valeurs de ces paramètres d'un site contaminé seront près des valeurs optimales de ces paramètres, plus la performance de la bioventilation sera grande. Huit paramètres sont retenus dans ce projet pour évaluer la performance de la bioventilation *in situ*. Le tableau A1-1 présente ces paramètres et leurs différentes plages (de la meilleure à la moins bonne) de valeurs. En plus de ces paramètres, l'absence d'une microflore indigène adaptée aux contaminants et un objectif d'enlèvement en hydrocarbures totaux plus grand que 95 %, de même qu'une concentration en métaux supérieure à 2 500 mg/kg, sont des facteurs qui contraignent l'utilisation de la bioventilation *in situ* comme technologie de restauration des sols.

Tableau A1-1. Critères d'applicabilité pour la bioventilation et plages de valeurs considérées

Paramètres	Valeurs
Perméabilité intrinsèque	> 1 darcy (> 10^{-8} cm^2)
	0,1 à 1 darcy (10^{-9} à 10^{-8} cm^2)
	0,01 à 0,1 darcy (10^{-10} à 10-8 cm^2)
	< 0,01 darcy (< 10^{-10} cm^2)
Structure et stratification du sol	Composition uniforme de sable ou gravier
	Composition uniforme de till sableux ou tourbe
	Composition uniforme de silt
	Remblai perméable
	Till sableux contenant des lentilles imperméables (argile)
	Remblai imperméable
	Argile très fracturée
	Roc métamorphique ou igné fracturé
	Argile peu fracturée
	Roc
pH du sol	6,8 à 7,2
	6 à 6,8 ou 7,2 à 8
	5 à 6 ou 8 à 9
	1 à 5 ou 9 à 14
Teneur en humidité du sol	5 à 15 % massique
	15 à 25 % massique
	2 à 5 % massique
	< 2 % ou > 25 % massique
Température du sol	20 à 40 oC
	10 à 20 oC
	5 à 10 oC
	< 5 ^{o}C ou > 40 ^{o}C
Profondeur de la nappe phréatique	> 3,00 mètres
	2,00 à 3,00 mètres
	1,00 à 2,00 mètres

	< 1,00 mètre
Structure chimique du contaminant (tension de vapeur)	< 1 mm Hg
	1 à 760 mm Hg
	> 760 mm Hg
Concentration et toxicité du contaminant (pour les hydrocarbures totaux)	< 1 000 mg/kg
	1 000 à 5 000 mg/kg
	5 000 à 10 000 mg/kg
	10 000 à 25 000 mg/kg
	>25 000 mg/kg

Coûts correspondants dans la littérature

Bien que très variables d'un site à un autre, les coûts de traitement d'un site par bioventilation *in situ* se situe dans une large plage de 4 à 25 €/m^3 (Air Force Center for Environmental Excellence, 1996). En règle générale, ces coûts vont diminuer avec une augmentation du volume de sol à traiter, principalement en raison d'une répartition sur un plus grand volume de sol des équipements nécessaires, peu importe le volume à traiter. De plus, la majorité des coûts associés au traitement d'un sol par bioventilation *in situ* est engendrée dès la première année de traitement puisque les coûts de suivi et de maintenance des équipements peuvent être relativement faibles.

Dimensionnement pour le traitement du site considéré

Le système de bioventilation *in situ* a été dimensionné pour traiter une contamination moyenne en diesel de 6145 mg/kg avec un objectif de restauration minimum de 700 mg/kg. La configuration du système retenu est l'extraction de l'air par des puits situés dans la contamination en raison du contrôle des émissions gazeuses qu'elle permet. Selon le type de contaminant à traiter, peu volatil, les teneurs en composés organiques volatils dans les gaz de traitement devraient être très faibles (U.S. Environmental Protection Agency 1995c). L'utilisation d'un biofiltre en surface convient parfaitement pour s'assurer que le courant gazeux rejeté à l'atmosphère est exempt de contaminants (ou à l'intérieur de la limite permise) (Seed and others 1993).

Afin d'éviter une remontée de la nappe dans le système d'aération, en raison de la dépression créée autour des puits d'extraction, une dépression maximale de 10 cm a été fixée à chaque puits. Cette valeur a été choisie en fonction de la profondeur de la contamination par rapport à la profondeur de la nappe phréatique. Puisque aucun test de perméabilité du sol à l'air n'a été effectué préalablement au dimensionnement, un débit d'extraction de 0,3 cfm a été également fixé, ce qui est inférieur, en raison de la faible remontée espérée de la nappe, à la plage type de débit (5 à 100 cfm) (U.S. Environmental Protection Agency 1995c).

À partir de ces paramètres et des caractéristiques du site, le rayon d'influence pneumatique (Johnson and others 1990) a été évalué à 4,66 mètres. À l'aide d'un taux de respiration *in situ* de 7,2 %/jour (Hinchee and Ong 1992), un rayon d'influence biologique de 4,05 mètres a été déterminé. En raison d'un rayon d'influence biologique plus faible que le pneumatique, la limitation en oxygène sur le site est considérée de nature biologique. À l'intérieur d'un rayon d'influence de 4,05 mètres et sur une profondeur de 1,5 mètres (profondeur de la contamination), une concentration en oxygène supérieure à 5 % est maintenue. En raison de l'influence d'un puits sur un autre, l'espacement réel entre les puits est de 1,414 fois le rayon d'influence biologique (U.S. Environmental Protection Agency 1995c), soit 5,7 mètres. Pour la surface totale de la zone à traiter, 150 puits d'extraction sont nécessaires pour maintenir une activité microbienne et ainsi réduire la teneur en contaminant dans le sol. Ce dimensionnement du

système de bioventilation *in situ* permet une biodégradation du contaminant jusqu'à l'objectif de 700 mg/kg en 2,9 années, selon le taux de respiration *in situ* retenu de 7,2 %/jour.

Le tableau A1-2 suivant présente la liste complète des équipements nécessaires pour la conception du système de bioventilation.

Tableau A1-2. Équipements nécessaires pour la conception du système de bioventilation *in situ*

Besoins en équipement				
Tuyaux	Plein	1"	0 m	
		2"	850 m	
		4"	60 m	
		6"	0 m	
		8"	0 m	
Raccords	Valve	1"	0 unité	
		2"	150 unités	
		4"	0 unité	
		6"	0 unité	
		8"	0 unité	
	Coude 90 degrés	1"	0 unité	
		2"	150 unités	
		4"	1 unité	
		6"	0 unité	
		8"	0 unité	
	Raccord T	1"	0 unité	
		2"	150 unités	
		4"	7 unités	
		6"	0 unité	
		8"	0 unité	
	Réducteur	4" x 2"	8 unités	
		6" x 4"	0 unité	
Jauge à pression			150 unités	
Pompe à vide (extraction d'air)	45,0 cfm		4,21 hp	1 unité
Biofiltre	Réservoir	Hauteur	2,5 m	
		Largeur	1,30 m	
		Longueur	1,30 m	
	Milieu filtrant		2,55 m³	
Tour d'humidification	Colonne	Hauteur	2,07 m	
		Diamètre	0,16 m	
	Garnissage	Pall Rings 1"		
		Volume	29,94 Litres	
	Tuyaux	1½"	1,88 m	
		6"	2 m	
	Coude 90 degrés	1½"	4 unités	
		6"	4 unités	
	Pompe à eau	3,79 GPM	0,005 hp	1 unité
Équipement nécessaire pour les puits d'extraction				
			1 puits	150 puits
Tuyaux	Plein	2"	0,55 m	82,5 m

	Crépiné	2"	1 m	150 m
	Bouchon	2"	1unité	150unités
Sable	Hauteur de l'espace annulaire		1,35m	202,5m
Joint de bentonite	Hauteur de l'espace annulaire		0,1m	15m
Ciment-Bentonite	Hauteur de l'espace annulaire		0,1m	15m
Équipement nécessaire pour les points de suivi				
			1point	21points
	Couvercle d'accès		1unité	21unités
Gravier	Hauteur pour diamètre 6"		0,1m	2,1m
Sable	Hauteur pour diamètre 6"		0,6m	12,6m
Ciment-Bentonite	Hauteur pour diamètre 6"		0,8m	16,8m
	Sonde à pH		1unité	21unités
	Sonde à vapeur		3unités	63unités
	Thermocouple		3unités	63unités

Tableau A1-3. BIOVENTILATION - Base de donnée temporaire pour la conception et l'opération du système

Description	Unité	Prix/ unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Installation du système				138 485,21 $
Coûts fixes				137 584,62 $
Forage (pour puits de ventilatilon actifs et passifs et les puits de suivi) *(Plusieurs composantes)*				36 184,31 $
Déplacement de l'équipement de forage sur le site	Heure	311,70 $	57	17 766,67 $
Forage, Diamètre de forage 101,6 mm, Profondeur <= 30m	30 cm	21,85 $	739	16 145,24 $
Forage, Diamètre de forage 152,4mm, Profondeur <= 30m	30 cm	21,85 $	104	2 272,40 $
Puits de ventillation (extraction) *(Plusieurs composantes)*				**33 312,37 $**
Tuyau plein ***(Plusieurs composantes)***				**1 918,86 $**
51mm diamètre, PVC Schedule 40, Longueur 3m	30 cm	7,08 $	271	1 918,86 $
Tuyau crépiné ***(Plusieurs composantes)***				**5 005,51 $**
51mm diamètre PVC Schedule 40, Longueur 3m	30 cm	10,15 $	493	5 005,51 $
Bouchon ***(Plusieurs composantes)***				**2 100,90 $**
51mm, PVC, Bouchon de fond	Chaque	14,01 $	150	2 100,90 $
Sable de silice ***(Plusieurs composantes)***				**5 170,49 $**
Sable de silice no2, sans contaminant, équivalent pour tuyau de 51mm	30 cm	7,78 $	665	5 170,49 $
Ciment ***(Plusieurs composantes)***				**48,70 $**
Ciment Portland, équivalent pour tuyau de 51mm	30 cm	0,97 $	50	48,70 $
Joint de bentonite (Joint annulaire) (Plusieurs composantes)				**1 625,91 $**
Joint annulaire, équivalent pour puits 51mm, Bentonite	Chaque	32,52 $	50	1 625,91 $
Valve ***(Plusieurs composantes)***				**11 226,00 $**
Robinet à tournant sphérique (*Ball valve*) 51mm, PVC Sch. 80	Chaque	74,84 $	150	11 226,00 $
Manomètres ***(Plusieurs composantes)***				**6 216,00 $**
Manomètre en acier, cadran de 50mm, 0 @ 2000 kPa	Chaque	41,44 $	150	**6 216,00 $**
Système de récupération des vapeurs *(Plusieurs composantes)*				**20 219,17 $**
Tuyauterie entre les puits ***(Plusieurs composantes)***				**8 926,61 $**
Collecteur principal (Manifold piping), 51mm(2") PVC Sch. 40	30 cm	2,75 $	2789	7 669,75 $
Collecteur principal (Manifold piping), 101,6mm (4") PVC Sch. 40	30 cm	6,38 $	197	1 256,86 $
Connecteur T, Coude 90°, Réducteur, Valve ***(Plusieurs composantes)***				**586,13 $**
Connecteur T, 51mm (2"), PVC Sch.40	Chaque	1,69 $	150	253,50 $
Connecteur T, 101,6mm (4"), PVC Sch.40	Chaque	13,23 $	7	92,61 $
Coude 90o, 51mm (2"), PVC Sch. 40	Chaque	1,37 $	150	205,50 $
Coude 90o, 101,6mm (4"), PVC Sch. 40	Chaque	8,92 $	1	8,92 $
Réducteur 101,6mm x 51mm, PVC Sch. 40	Chaque	3,20 $	8	25,60 $
Soufflante pour l'extraction des vapeurs ***(Plusieurs composatnes)***				**3 194,60 $**
5 HP, 90 SCFM	Chaque	3 194,60 $	1	3 194,60 $
Manomètres ***(Plusieurs composantes)***				**82,88 $**
Manomètre en acier, cadran de 50mm, 0 @ 2000 kPa	Chaque	41,44 $	2	**82,88 $**
Biofiltre ***(Plusieurs composantes)***				**2 839,05 $**
Réservoir *(Plusieurs composantes)*				2 809,87 $
7500 litres, Acier	Chaque	2 809,87 $	1	2 809,87 $
Gravier	0,03 m3	0,80 $	30	24,00 $
Toile de recouvrement pour pile, resistance de 185 lb à la déchirure, durée de vie:3-4 ans	0,84 m2	2,59 $	2	5,18 $
Pompe à eau				
Tour d'humidification ***(Plusieurs composantes)***				**2 804,90 $**
Garnissage	0,03 m3	32,48 $	1,06	34,43 $
Colonne	Kg	6,18 $	58,15	359,64 $
Support inférieur	Chaque	307,89 $	1	307,89 $
Support supérieur	Chaque	461,84 $	1	461,84 $
Redistributeur de liquide	Chaque	230,92 $	1	230,92 $
Distributeur de liquide	Chaque	533,17 $	1	533,17 $

Tableau A1-3. BIOVENTILATION - Base de donnée temporaire pour la conception et l'opération du système

Description	Unité	Prix/ unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Pompe centrifuge (bronze), 25 GPM, 10' Tête, 0,25 HP (valeurs adaptées de la BD)	Chaque	680,08 $	1	680,08 $
Connection tuyaux d'eau *(Plusieurs composantes)*				19,13 $
Tuyaux de connection PVC, Sch. 40, 38,1mm	30 cm	2,31 $	7	16,17 $
Coude 90°, PVC Sch. 40, 38,1mm	30 cm	0,74 $	4	2,96 $
Connection tuyaux d'air *(Plusieurs composantes)*				177,80 $
Tuyaux de connection PVC, Sch. 40, 152mm	30 cm	9,20 $	7	64,40 $
Coude 90°, PVC Sch. 40, 152mm	30 cm	28,35 $	4	113,40 $
Port d'échantillonnage	Chaque	11,90 $	150	1 785,00 $
Puits de suivi *(Plusieurs composantes)*				**25 295,02 $**
Gravier *(Plusieurs composantes)*				**73,64 $**
Gravier, puits de 152mm	30 cm	10,52 $	7	73,64 $
Sable *(Plusieurs composantes)*				**835,60 $**
Sable de silice no2, sans contaminant, pour tuyau perforé de 152mm	30 cm	19,90 $	42	835,60 $
Ciment *(Plusieurs composantes)*				**2 191,17 $**
Ciment Portland, pour tuyau de 152mm	30 cm	39,13 $	56	2 191,17 $
Couvercle de puits *(Plusieurs composantes)*				**3 196,83 $**
Couvercle de trou-d'homme, étanche à l'eau, avec serrure, 20cm x 19cm	Chaque	152,23 $	21	3 196,83 $
Sondes, thermocouple et système d'acquisition de données *(Plusieurs composantes)*				**18 997,77 $**
Tube de nylon, 6,3mm Diamètre extérieur	30 cm	0,40 $	180	72,00 $
Capteur en PVC, 25,4mm Diamètre, 152,4mm longueur	Chaque	1,00 $	63	63,00 $
Raccord express ("quick connect")	Chaque	17,00 $	63	1 071,00 $
Câble de thermocouple, type K	30 cm	0,80 $	180	144,00 $
Prise pour thermocouple	Chaque	5,00 $	63	315,00 $
Sonde pH (Détails)	Chaque	825,37 $	21	17 332,77 $
Abri pour matériel et pompe	Chaque	747,00 $	1	747,00 $
Employés, ouvriers et per-diem *(Plusieurs composantes)*				**21 826,75 $**
Gestionnaire de projet (Sénior)	Heure	45,01 $	10	450,10 $
Gestionnaire de projet	Heure	41,52 $	25	1 038,00 $
Ingénieur Sénior	Heure	34,05 $	10	340,50 $
Ingénieur de projet	Heure	26,51 $	25	662,75 $
Ingénieur	Heure	24,78 $	80	1 982,40 $
Scientifique	Heure	20,67 $	40	826,80 $
Secrétaire	Heure	13,24 $	10	132,40 $
Dessinateur	Heure	17,19 $	20	343,80 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	3	637,50 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	150	15 412,50 $
Coûts variables				**900,59 $**
Système de récupération des vapeurs *(Plusieurs composantes)*				**270,09 $**
Biofiltre *(Plusieurs composantes)*				**270,09 $**
Milieu filtrant- Compost de fumier de poules pondeuses	0,03 m3	1,52 $	36	54,72 $
Milieu filtrant- Tourbe de sphaigne et perlite (80-20 % v/v)	0,03 m3	2,78 $	45	125,10 $
Milieu inerte- Perlite	0,03 m3	10,03 $	9	90,27 $
Employés, ouvriers et per-diem *(Plusieurs composantes)*				**630,50 $**
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	2	425,00 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	2	205,50 $

Tableau A1-3. BIOVENTILATION - Base de donnée temporaire pour la conception et l'opération du système

Description	Unité	Prix/ unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Suivi du procédé et caractérisation				**66 391,67 $**
Coûts fixes				**5 000,00 $**
Analyse de l'effluent gazeux *(Plusieurs composantes)*				**5 000,00 $**
Échantillonneur en continu avec mesure du débit d'air	Chaque	5 000,00 $	1	5 000,00 $
Coûts variables				**61 391,67 $**
Analyse des sols *(Plusieurs composantes)*				**25 465,10 $**
Foreuse *(Plusieurs composantes)*				**169,40 $**
Foreuse mécanique avec assemblage (location)	Jour	16,94 $	10	169,40 $
Décontamination des équipements d'échantillonnage *(Détails)*	Chaque	7,01 $	20	140,10 $
Matériels jetables nécessaires à l'échantillonnage *(Détails)*	Chaque	7,91 $	20	158,20 $
Analyse chimiques des sols en laboratoire *(Plusieurs composantes)*				**6 806,40 $**
Organiques volatils (SW 5035/SW8260B)	Chaque	183,33 $	20	3 666,60 $
Diesel (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	123,33 $	20	2 466,60 $
pH (EPA 9040 / 9041 / 9045)	Chaque	7,56 $	20	151,20 $
Teneur total en carbone organique (TOC) (EPA 9060)	Chaque	26,10 $	20	522,00 $
Analyse des gaz dans le sol en laboratoire *(Plusieurs composantes)*				**18 191,00 $**
Sac Tedlar (un constituant) (5041/8260B)	Chaque	100,00 $	42	4 200,00 $
Collecte et analyse des vapeurs dans le sol	Jour	95,00 $	10	950,00 $
BTEX/ Hydrocarbures pétroliers volatils totaux (5041 / 8021B / 8015B)	Chaque	80,00 $	42	3 360,00 $
Semi-volatils (TO-13)	Chaque	230,50 $	42	9 681,00 $
Analyse de l'effluent gazeux *(Plusieurs composantes)*				**6 444,18 $**
Analyseur portable de composés organiques volatiles (Location) *(Plusieurs composantes)*				**4 510,00 $**
Location à la journée	Jour	102,50 $	44	4 510,00 $
Analyseur portable de gas carbonique (Location)	Mois	375,00 $	2,5	937,50 $
Analyseur portable du manque d'oxygène (Location)	Mois	398,67 $	2,5	996,68 $
Employés, ouvriers et per-diem *(Plusieurs composantes)*				**29 482,40 $**
Ouvrier	Heure	16,63 $	1080	17 960,40 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	2	425,00 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	108	11 097,00 $
Fermeture du site				**25 733,65 $**
Coûts fixes				**21 541,95 $**
Analyse des sols *(Plusieurs composantes)*				**12 732,55 $**
Foreuse *(Plusieurs composantes)*				**84,70 $**
Foreuse mécanique avec assemblage	Jour	16,94 $	5	84,70 $
Décontamination des équipements d'échantillonnage *(Détails)*	Chaque	7,01 $	10	70,05 $
Matériels jetables nécessaires à l'échantillonnage *(Détails)*	Chaque	7,91 $	10	79,10 $
Analyse chimiques des sols en laboratoire *(Plusieurs composantes)*				**3 403,20 $**
Organiques volatils (SW 5035/SW8260B)	Chaque	183,33 $	10	1 833,30 $
Diesel (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	123,33 $	10	1 233,30 $
pH (EPA 9040 / 9041 / 9045)	Chaque	7,56 $	10	75,60 $

Tableau A1-3. BIOVENTILATION - Base de donnée temporaire pour la conception et l'opération du système

Description	Unité	Prix/ unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Teneur total en carbone organique (TOC) (EPA 9060)	Chaque	26,10 $	10	261,00 $
Analyse des gaz dans le sol en laboratoire ***(Plusieurs composantes)***				**9 095,50 $**
Collecte et analyse des vapeurs dans le sol	Jour	95,00 $	5	475,00 $
Sac Tedlar (un constituant) (5041/8260B)	Chaque	100,00 $	21	2 100,00 $
BTEX/ Hydrocarbures pétroliers volatils totaux (5041 / 8021B / 8015B)	Chaque	80,00 $	21	1 680,00 $
Semi-volatils (TO-13)	Chaque	230,50 $	21	4 840,50 $
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démentellement des équipements)* ***(Pluseurs composantes)***				**8 809,40 $**
Gestionnaire de projet (Sénior)	Heure	45,01 $	5	225,05 $
Gestionnaire de projet	Heure	41,52 $	10	415,20 $
Ingénieur Sénior	Heure	34,05 $	15	510,75 $
Ingénieur de projet	Heure	26,51 $	20	530,20 $
Ingénieur	Heure	24,78 $	40	991,20 $
Secrétaire	Heure	13,24 $	25	331,00 $
Ouvrier	Heure	16,63 $	200	3 326,00 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	2	425,00 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	20	2 055,00 $
Coûts variables				**4 191,70 $**
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démentellement des équipements)* ***(Pluseurs composantes)***				**4 191,70 $**
Ouvirer	Heure	16,63 $	140	2 328,20 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	2	425,00 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	14	1 438,50 $
Autres				**1 036,20 $**
Coûts variables				**1 036,20 $**
Besoin en électricité	KWH	0,05 $	20724	1 036,20 $
Fin de la base de données				
Coûts total du traitement par bioventilation ***in-situ*** **pour une année**	$			**231 646,73 $**
Coûts fixes	**$**			**164 126,56 $**
Coûts variables	**$**			**67 520,16 $**
Proportions des coûts fixes				**100,0%**
Proportions des coûts variables				**100,0%**
Durée totale du projet	**AN**		**5,00**	
Coûts totaux du traitement par bioventilation ***in-situ*****, durée totale du projet**	**$**			**501 727,38 $**
Densité du sol	**kg/m^3**		**1875**	
Volume de sol traité, m^3	**m^3**		**7895**	
Coûts totaux du traitement par bioventilation in-situ, durée totale du projet, par m^3	**$\$/m^3$**			**63,55 $**
Coûts totaux du traitement par bioventilation in-situ, durée totale du projet, par tonne	**$/T**			**33,90 $**
Proportions des coûts totaux, durée totale du projet				**100,0%**

Références

Air Force Center for Environmental Excellence. 1996. Bioventing: Performance and Cost Results From Multiple Air Force Test Sites. *Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division*, Texas, 26 pp.

Federal Remediation Technologies Roundtable, Environmental Protection Agency, Department of Defense (U.S. Air Force; U.S. Army; U.S. Navy), Department of Energy, Department of Interior, National Aeronautics and Space Administration, Tennessee Valley Authority and Coast Guard. 1998. Guide to Documenting and Managing Cost and Performance Information for Remediation Projetcts. EPA/542/B-98/007. *Federal Remediation Technologies Roundtable*, 77 pp.

Hinchee, R. E. 1994. Bioventing of Petroleum Hydrocarbons. Pages 39-59 in *R. D. Norris ed.* Handbook of Bioremediation. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

Hinchee, R. E. and S. K. Ong. 1992. A rapid in situ respiration test for measuring aerobic biodegradation rates of hydrocarbons in soil. *Journal of air & waste management association* 42(10): 1305-1312.

Johnson, P. C. and R. A. Ettinger. 1994. Considerations for the design of in situ vapor extraction systems: radius of influence vs. zone of remediation. *Ground water monitoring review* 14(Summer): 123-128.

Johnson, P. C., C. C. Stanley, M. W. Kemblowski, D. L. Byers and J. D. Colthart. 1990. A Practical Approach to the Design, Operation, and Monitoring of In Situ Soil-Venting Systems. *Ground Water Monitoring Review* 10(2): 159-178.

Seed, L., B. Harper, W. Parker and R. L. Corsi. 1993. Biofiltration of BTEX in soil remediation off-gas. Pages 297-314 in *Proceedings of the Third Soil and Groundwater Remediation Symposium*, Quebec City, Canada.

Stanin, F. T., M. B. Phelps, J. W. Ratz, D. C. Downey, A. Lesson, M. Jenner, P. E. Haas and R. N. Miller. 1996. A General Evaluation of Bioventing for Removal Actions at Air Force / Department of Defense Installations NationWide; General Engineering Evaluation / Cost Analysis (EE/CA). *Air Force Center for Environmental Excellence (AFCEE), Technology Transfer Division*, Brooks Air Force Base, San Antonio, Texas, 147 pp.

U.S. Environmental Protection Agency. 1995a. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. EPA/510/B-95/007. *US EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response*, Washington, DC., 363 pp.

U.S. Environmental Protection Agency. 1995b. Principles and Practices of Bioventing, Volume 1: Bioventing Principles. EPA/540/R-95/534a. *US EPA, Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory*, Cincinnati.

U.S. Environmental Protection Agency. 1995c. Principles and Practices of Bioventing, Volume 2: Bioventing Design. EPA/540/R-95/534a. *US EPA, Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory*, Cincinnati.

Annexe 2

FICHE TECHNOLOGIQUE

BIOPILE

Catégorie : Biologique **Type : *Ex situ***

Description de la technologie

Le traitement en biopile consiste à excaver un sol contaminé et à le mettre en pile, pouvant atteindre 4 mètres de hauteur (Jorgensen and others 2000) (mais plus généralement de 1,5 à 3 mètres), sur un système d'aération. Ce traitement aérobie est fondé sur l'utilisation, par les microorganismes présents dans le sol, des contaminants comme source de carbone et de l'oxygène comme accepteur d'électrons. L'objectif est de maintenir un apport suffisant en oxygène aux microorganismes par l'injection ou l'extraction d'air dans le sol, tout en minimisant la volatilisation des contaminants les plus légers.

Bien que nécessitant une attention particulière tout au long de la préparation du traitement, la conception d'une biopile est relativement simple. Une vue en coupe d'un tel système montre à la base une série de couches imperméables (argile, géomembrane et revêtement d'asphalte) afin d'éviter toute contamination du sol sous l'aire de traitement, un système de récupération du lixiviat sous la biopile, un système d'aération (une ou plusieurs séries de tuyaux perforés, généralement en PVC), le sol à traiter (une partie du sol peut être mis en place sous le système d'aération), une membrane semi-perméable à la surface de la pile empêchant l'infiltration d'eau dans la biopile et limitant une éventuelle volatilisation des contaminants tout en permettant le passage de l'air de l'atmosphère vers la biopile afin d'en assurer son aération (von Fahnestock and others 1998).

L'apport en oxygène aux microorganismes peut être fourni soit par une injection ou une extraction d'air dans la biopile. Le mode d'opération par extraction permet un contrôle des gaz de traitement en les canalisant vers un système de traitement des gaz, tel un biofiltre (Lei and others 1994). Dans un contexte permettant le rejet des gaz directement à l'atmosphère sans traitement préalable (il a été démontré auprès des autorités compétentes que les contaminants traités ne sont pas volatils, par exemple), le système par injection d'air dans la biopile est économiquement plus viable et plus simple à opérer (von Fahnestock and others 1998).

Le traitement en biopile permet un ajustement des conditions du sol avant sa mise en place, permettant ainsi d'augmenter la performance de la technologie. Ainsi, les grosses particules (roches par exemple) peuvent être retirées du sol et nettoyées avant d'être disposées. Les teneurs en nutriments et en humidité peuvent être ajustées, de même que le pH et la porosité générale du sol par l'ajout de chaux et de copeaux de bois respectivement (Jorgensen and others 2000, von Fahnestock and others 1998).

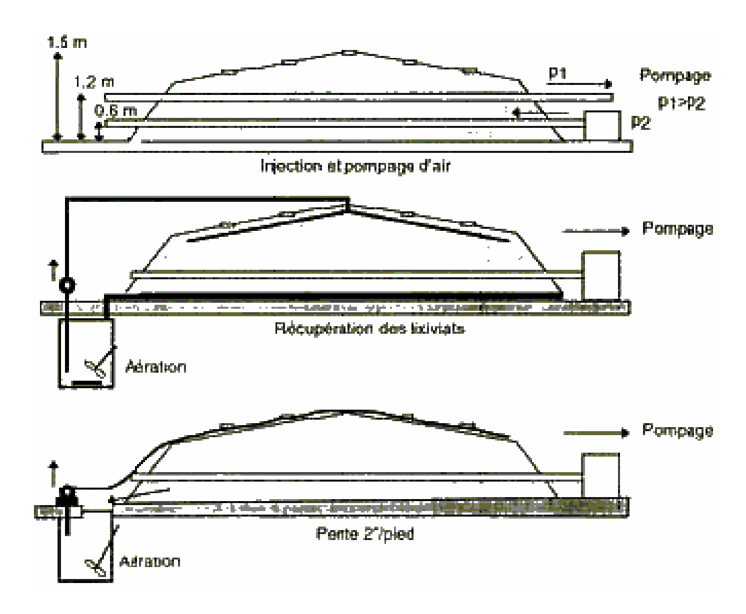


Figure A2-1. Vue schématique d'un système de traitement en biopile

Performance

La réussite d'un traitement en biopile, étant une technologie biologique, est conditionnelle à la présence d'une microflore indigène adaptée aux contaminants à traiter. Sans cette présence, la restauration ne peut avoir lieu, à moins d'inoculer le sol par des microorganismes exogènes à ce dernier. Cette dernière opération est toutefois réglementée, voire même interdite, selon les pays.

Une fois s'être assuré de la présence d'une telle activité microbienne dans le sol excavé, la teneur en humidité de ce dernier, son pH, sa température, sa teneur en nutriments et sa concentration en oxygène peuvent également affecter la performance de la technologie (Lei and others 1994, U.S. Environmental Protection Agency 1995, Federal Remediation Technologies Roundtable and others 1998, von Fahnestock and others 1998, Jorgensen and others 2000). Pour l'ensemble de ces paramètres, leur valeur peuvent être facilement ajustée avant le traitement et maintenu tout au long de la restauration (la teneur en oxygène n'est considérée que durant le traitement et maintenue par le système d'aération). C'est pour cette raison que la performance d'un traitement en biopile n'est pas traitée dans cette étude comme fonction du respect des valeurs optimales de ces paramètres, mais plutôt comme une constante si quatre critères sont respectés. Si, et seulement si, les quatre critères ci-dessous sont respectés (U.S. Environmental Protection Agency 1995), la performance d'un traitement en biopile est de 100 %. Si un de ces critères n'est pas respecté et ne peut pas être corrigé, la performance du traitement est nulle. Ces critères sont :

1. Objectif d'enlèvement en hydrocarbures totaux inférieur à 95 %.
2. Concentration initiale inférieure à 50 000 mg hydrocarbures totaux/kg.
3. Concentration en métaux inférieure à 2 500 mg/kg.
4. Présence d'une microflore indigène active.

Coûts

Bien que très variable d'un site à un autre, le coût total d'un traitement en biopile est évalué entre 35 et 63 €/m^3 (Lei and others 1994). Ce coût n'inclut pas, règle générale, les coûts d'excavation du sol et de transport sur le site de traitement, s'il y a lieu) (Enviro Accès, 1997). Dans un

traitement en biopile, les coûts de suivi et de maintenance peuvent être relativement élevés en raison des activités mécaniques entourant le procédé de restauration, notamment le brassage des sols. Si le traitement implique la construction de l'aire de traitement (mise en place d'une couche d'argile, d'une membrane imperméable et d'un revêtement d'asphalte), le coût total du traitement peut être beaucoup plus important et la majeure partie des déboursées est encourue durant la première année.

Les coûts de traitement d'un sol en biopile sont influencés par le type de centre de traitement retenu (dans un centre de traitement commercial, dans un centre de traitement temporaire construit pour traiter uniquement le sol contaminé considéré ou dans un centre de traitement permanent construit en premier lieu pour le sol à traiter, mais pouvant servir par la suite au traitement d'autres sols contaminés) (von Fahnestock and others 1998). Le tableau A2-2 présente les coûts de traitement en biopile sous la forme d'une base de données temporaire.

Dimensionnement pour le traitement du site considéré

Le système de traitement en biopile est conçu pour la décontamination d'un volume non excavé de 7895 m^3 de sol (9868 m^3 lorsque excavé et mis en place) contaminé au diesel à une concentration de 6145 mg/kg et dont l'objectif de restauration est de moins de 700 mg/kg, soit une réduction en concentration de 5445 mg/kg. La dimension d'une biopile est de 10 mètres de largeur, 50 mètres de longueur et 1,5 mètres de hauteur. La hauteur de la biopile est limitée afin d'éviter une compaction du sol et ainsi une diminution de la biodégradation en raison d'un manque d'oxygène. Une configuration par extraction d'air à partir de la biopile est privilégiée afin de contrôler la composition des émissions gazeuses.

Le diesel est considéré comme ayant une composition de n-alkanes allant de C_{11} à C_{24} (Meyers 1998). En utilisant un taux de consommation d'oxygène de 88 %/jour ainsi qu'un ratio d'utilisation de l'oxygène entre les contaminants et les autres sources de carbone dans le sol de 66 % (Reisinger and others 1996), un taux de biodégradation de 43,3 mg diesel/(kg jour) a été estimé. Ainsi, pour une réduction du contaminant à la concentration désirée, un besoin minimal en oxygène de 126,7 m^3 oxygène / m^3 sol a été estimé. Cette estimation repose en partie sur un ratio de 24,7 moles d'oxygène requises pour biodégrader 1 mole de diesel (valeur pondérée selon la composition du diesel en C_{11}-C_{24}). En considérant le ratio d'utilisation de l'oxygène par le contaminant et les autres sources de carbone dans le sol, le besoin minimal en oxygène augmente à 191,9 m^3 oxygène / m^3 sol.

Le temps requis pour atteindre l'objectif de restauration est de 4,2 mois (126 jours). Selon l'espace disponible sur le site pour la mise en place des biopiles et considérant un espace de huit mètres entre chacune, cinq biopiles peuvent être mise en service, pour un total de 10 volumes de biopile par année. Ceci définit la durée totale de la restauration de l'ensemble du sol contaminé à 8,4 mois/année, pendant deux années de traitement. Si, pour un système identique à celui-ci (soit 5 biopiles par série de traitement), tout le sol devait être traité en une année, la concentration initiale maximale ne pourrait dépasser 3 600 mg/kg.

Un facteur de sécurité de 2 est utilisé sur le besoin minimal en oxygène et les cinq biopiles mise en service en parallèle sont connectées sur le même système d'aération de 199 cfm.

Les effluents gazeux sortant des cinq biopiles sont acheminés vers une tour d'humidification et un biofiltre pour s'assurer que leur concentration lors de leur rejet à l'atmosphère ne dépasse pas les limites permises par la réglementation.

Le tableau A2-1 suivant présente la liste complète des équipements nécessaires pour la conception du système de biopiles.

Tableau A2-1. Équipements nécessaires pour la conception du système de biopiles

Besoin en équipement				
Tuyaux	Pleins	1"	0	m
		2"	0	m
		4"	107	m
		6"	0	m
		8"	0	m
	Perforés	1"	0	m
		2"	2776	m
		4"	0	m
		6"	0	m
		8"	0	m
Raccords	Valves	1"	0	unités
		2"	15	unités
		4"	0	unités
		6"	0	unités
		8"	0	unités
	Coudes 90 degrés	1"	0	unités
		2"	0	unités
		4"	12	unités
		6"	0	unités
		8"	0	unités
	Raccords T	1"	0	unités
		2"	0	unités
		4"	14	unités
		6"	0	unités
		8"	0	unités
	Réducteurs	4"x2"	16	unités
Jauge à pression			15	unités
Pompe à vide	198,8	Cfm	1,01	hp
Pompe à eau (irrigation)	66,0	GPM	0,11	hp
Biofiltre	Réservoir	Hauteur	2,5	m
		Largeur	2,74	m
		Longueur	2,74	m
	Milieu filtrant		11,3	m^3
Tour d'humidification	Colonne	Hauteur	2,1	m
		Diamètre	0,32	m
	Garnissage	Pall Rings 1"		
		Volume	126,49	L
	Tuyaux	1½"	2,23	m
		6"	2,00	m
	Coudes 90 degrés	1½"	4	unités
		6"	4	unités
	Pompe à eau	12,55 GPM	0,0004	hp
Collecte des eaux usées	Réservoir souterrain	Hauteur	1	m
		Diamètre	1,6	m
		Volume	2010	litres

	Tuyaux fendus	2"	200 m
	Tuyaux pleins double parois	2"; 4"	75 m
Nutriments	Urée		7525,46 kg
			0,95 kg /m^3 sol
	Phosphate de diammonium		1643,77 kg
			0,21 kg /m^3 sol
Copeaux de bois			789,46 m^3

Tableau A2-2. BIOPILE - Base de données temporaire pour la conception et l'opération du système

Description	Unité	Prix/unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Installation du système	**$**			**743 136,54 $**
Coûts fixes	**$**			**678 587,36 $**
Préparation du site *(Plusieurs composantes)*				**557 322,02 $**
Clôture galvanisée, 3m hauteur, 3 fils de barbelé	30 cm	30,80 $	1723	53 077 $
Géotextile, HDPE 1,5mm	0,093 m2	1,77 $	107101	190 024 $
Attache pour toile, fixation adaptée pour le béton	Chaque	4,00 $	600	2 400 $
Toile de recouvrement pour pile, résistance de 84 kg à la déchirure, durée de vie:3-4 ans	0,84 m2	2,59 $	4784	12 401 $
Abri pour matériels et pompes	Chaque	249,00 $	3	747 $
Pavage d'asphalte *(Détails)*	0,84 m2	22,17 $	11900	263 794 $
Argile, épaisseur de 200 mm, Source externe au site *(Détails)*	0,76 m3	13,19 $	2645	34 879 $
Sonde à vapeurs *(Plusieurs composantes)*				**1 307 $**
Sonde à vapeurs dans les sols *(Détails)*	Chaque	37,34 $	35	1 307 $
Système d'aération *(Plusieurs composantes)*				**23 321 $**
Tuyau plein ***(Plusieurs composantes)***				**2 246 $**
Collecteur principal (*Manifold piping*), 101,6mm (4") PVC Sch. 40	30 cm	6,38 $	352	2 246 $
Connecteur T, Coude 90°, Réducteur, Valve ***(Plusieurs composantes)***				**1 466 $**
Connecteur T, 101,6mm (4"), PVC Sch.40	Chaque	13,23 $	14	185 $
Coude 90°, 101,6mm (4"), PVC Sch. 40	Chaque	8,92 $	12	107 $
Réducteur 101,6mm x 51mm, PVC Sch. 40	Chaque	3,20 $	16	51 $
Valve ballon (Ball valve) 51mm, PVC Sch. 80	Chaque	74,84 $	15	1 123 $
Manomètres ***(Plusieurs composantes)***				**704 $**
Manomètre en acier, cadran de 50mm, 0 @ 2000 kPa	Chaque	41,44 $	17	**704 $**
Soufflante pour l'extraction des vapeurs ***(Plusieurs composatnes)***				**6 388 $**
11,2 kW (15 HP), 475 m^3/h (280 SCFM)	Chaque	6 387,60 $	1	6 388 $
Biofiltre ***(Plusieurs composantes)***				**5 383 $**
Réservoir *(Plusieurs composantes)*				5 275 $
19000 litres, Acier	Chaque	5 275,29 $	1	5 275 $
Gravier	0,03 m3	0,80 $	106	85 $
Toile de recouvrement pour pile, résistance de 84kg à la déchirure, durée de vie:3-4 ans	0,84 m2	2,59 $	9	23 $
Pompe à eau				
Tour d'humidification ***(Plusieurs composantes)***				**4 018 $**
Garnissage	0,03 m3	32,48 $	4,54	147 $
Colonne	Kg	6,18 $	236	1 458 $
Support inférieur	Chaque	307,89 $	1	308 $
Support supérieur	Chaque	461,84 $	1	462 $
Redistributeur de liquide	Chaque	230,92 $	1	231 $
Distributeur de liquide	Chaque	533,17 $	1	533 $
Pompe centrifuge (bronze), 5,6 m^3/h, 3m de charge, 18 kW (valeurs adaptées de la BD)	Chaque	680,08 $	1	680 $
Connection tuyaux d'eau *(Plusieurs composantes)*				21 $
Tuyaux de connection PVC, Sch. 40, 38mm (1 ½")	30 cm	2,31 $	8	18 $
Coude 90°, PVC Sch. 40, 38mm (1 ½")	30 cm	0,74 $	4	3 $
Connection tuyaux d'air *(Plusieurs composantes)*				178 $
Tuyaux de connection PVC, Sch. 40, 152,4mm (6")	30 cm	9,20 $	7	64 $
Coude 90o, PVC Sch. 40, 152,4mm (6")	30 cm	28,35 $	4	113 $
Employés, ouvriers et per-diem ***(Plusieurs composantes)***				**3 116 $**
Ouvirer	Heure	16,63 $	100	1 663 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	2	425 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	10	1 028 $
Récupération des eaux usées et irrigation *(Plusieurs composantes)*				**15 181 $**
Récupération du lixiviat ***(Plusieurs composantes)***				**9 335 $**
Tuyau fendu, PVC Sch. 40, 51mm (2"), 2 à 3 rangées de fentes	30 cm	3,47 $	657	2 280 $
Tuyau double parois, PVC Sch. 40 (51mm (2"), 101,6mm (4")) (Détails)	30 cm	16,55 $	247	4 087 $
Réservoir souterrain, 2000 litres, acier, double paroi	Chaque	2 968,70 $	1	2 969 $
Irrigation des biopiles ***(Plusieurs composantes)***				**5 845 $**
Tuyaux perforés pour l'irrigation des biopiles, 51mm (valeurs adaptées de la BD)	30 cm	1,77 $	1149	2 037 $
Tuyaux de connection, PVC Sch. 40, 25,4mm	30 cm	1,81 $	460	834 $
Valve ballon, PVC Sch. 80, 1" (Ball Valve) (valeurs adaptées de la BD)	Chaque	50,00 $	5	250 $
Coude 90°, PVC Sch. 40, 25,4mm	Chaque	0,46 $	1	0 $
Raccord T, PVC Sch. 40, 25,4mm	Chaque	0,60 $	4	2 $
Pompe submersible, 17 m^3/h, Sortie de 51mm, 12m de charge, 1,1 kW, un étage	Chaque	2 721,63 $	1	2 722 $
Employés, ouvriers et per-diem *(Plusieurs composantes)*				**81 457 $**
Gestionnaire de projet (Sénior)	Heure	45,01 $	10	450 $
Gestionnaire de projet	Heure	41,52 $	25	1 038 $

Tableau A2-2. BIOPILE - Base de données temporaire pour la conception et l'opération du système

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Ingénieur Sénior	Heure	34,05 $	10	341 $
Ingénieur de projet	Heure	26,51 $	25	663 $
Ingénieur	Heure	24,78 $	80	1 982 $
Scientifique	Heure	20,67 $	40	827 $
Secrétaire	Heure	13,24 $	10	132 $
Dessinateur	Heure	17,19 $	20	344 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	8	1 700 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	720	73 980 $
Coûts variables	$			**64 549 $**
Excavation des sols *(Plusieurs composantes)*				**12 789 $**
Excavation, Excavatrice hydraulique, 2 CY, 75 CY/h (57 m^3/h)	0,76 m3	2,48 $	5163	12 789 $
Placement du sols *(Plusieurs composantes)*				**20 398 $**
Addition de produits *(Plusieurs composantes)*				**1 394 $**
Copeaux de bois	0,03 m3	0,10 $	13940	1 394 $
Ajout nutriments dans le sol (Plusieurs composantes)				**3 017 $**
Urée	Kg	0,40 $	3671	1 468 $
Phosphate de diammonium	Kg	1,96 $	790	1 548 $
Mise en place des sols *(Plusieurs composantes)*				**15 987 $**
Excavatrice hydraulique, 2 CY, 75 CY/h (57 m^3/h)	0,76 m3	2,48 $	6454	15 987 $
Système d'aération *(Plusieurs composantes)*				**16 501 $**
Tyuau perforé ou fendu pour l'aération des biopiles *(Plusieurs composantes)*				**15 300 $**
PVC, perforé, 101,6mm (4") (Sans excavation)	30 cm	3,19 $	4794	15 300 $
Biofiltre *(Plusieurs composantes)*				**1 200 $**
Milieu filtrant- Compost de fumier de poules pondeuses	0,03 m3	1,52 $	160	243 $
Milieu filtrant- Tourbe de sphaigne et perlite (80-20 % v/v)	0,03 m3	2,78 $	200	556 $
Milieu inerte- Perlite	0,03 m3	10,03 $	40	401 $
Employés, ouvriers et per-diem *(Plusieurs composantes)*				**14 861 $**
Gestionnaire de projet	Heure	41,52 $	5	208 $
Ingénieur Sénior	Heure	34,05 $	10	341 $
Ingénieur de projet	Heure	26,51 $	10	265 $
Ingénieur	Heure	24,78 $	20	496 $
Secrétaire	Heure	13,24 $	10	132 $
Ouvirer	Heure	16,63 $	40	665 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	2	425 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	120	12 330 $
Suivi du traitement	$			**75 660 $**
Coûts fixes	$			**5 000 $**
Essai de respirométrie *(Plusieurs composantes)*				**5 000 $**
Lecteur en continu d'un débit d'air	Chaque	5 000,00 $	1	5 000 $
Coûts variables	$			**70 660 $**
Brassage des sols *(Plusieurs composantes)*				**15 987 $**
Excavation, Excavatrice hydraulique, 2 CY, 75 CY/h (57 m^3/h)	0,76 m3	2,48 $	6454	15 987 $
Essai de respirométrie *(Plusieurs composantes)*				**5 638 $**
Location d'un analyseur de gaz (Portatif)	Jour	102,50 $	55	5 638 $
Analyse des sols *(Plusieurs composantes)*				**31 370 $**
Sonde *(Plusieurs modèles)*				**320 $**
pour récupérer le sol, non fendue, 22,2mm x 60cm ou 28,6mm x 30cm	Chaque	160,00 $	2	320 $
Décontamination des équipements d'échantillonnage *(Détails)*	Chaque	7,01 $	350	2 452 $
Matériels jetables nécessaires à l'échantillonnage *(Détails)*	Chaque	7,91 $	70	554 $
Analyse chimiques des sols en laboratoire *(Plusieurs composantes)*				**25 944 $**
Organiques volatils (SW 5035/SW8260B)	Chaque	183,33 $	70	12 833 $
Diesel (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	123,33 $	70	8 633 $
pH (EPA 9040 / 9041 / 9045)	Chaque	7,56 $	70	529 $
Teneur total en carbone organique (TOC) (EPA 9060)	Chaque	26,10 $	70	1 827 $
Nitrate (EPA 9210)	Chaque	30,31 $	70	2 122 $
Analyse microbiologique des sols en laboratoire *(Plusieurs composantes)*				**2 100 $**
Dégradeurs d'hydrocarbures	Chaque	30,00 $	70	2 100 $
Employés, ouvriers et per-diem *(Plusieurs composantes)*				**17 666 $**
Ouvrier	Heure	16,63 $	600	9 978 $

Tableau A2-2. BIOPILE - Base de données temporaire pour la conception et l'opération du système

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	12	2 550 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	50	5 138 $
Fermeture du site	**$**			**70 902 $**
Coûts fixes	**$**			**16 842 $**
Analyse des sols ***(Plusieurs composantes)***				**13 506 $**
Décontamination des équipements d'échantillonnage ***(Détails)***	Chaque	7,01 $	42	294 $
Matériels jetables nécessaires à l'échantillonnage ***(Détails)***	Chaque	7,91 $	42	332 $
Analyse chimiques des sols en laboratoire ***(Plusieurs composantes)***				**12 880 $**
Organiques volatils (SW 5035/SW8260B)	Chaque	183,33 $	42	7 700 $
Diesel (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	123,33 $	42	5 180 $
Employés, ouvriers et per-diem ***(Plusieurs composantes)***				**3 336 $**
Gestionnaire de projet (Sénior)	Heure	45,01 $	5	225 $
Gestionnaire de projet	Heure	41,52 $	10	415 $
Ingénieur Sénior	Heure	34,05 $	15	511 $
Ingénieur de projet	Heure	26,51 $	20	530 $
Ingénieur	Heure	24,78 $	40	991 $
Secrétaire	Heure	13,24 $	25	331 $
Ouvrier	Heure	16,63 $	20	333 $
Coûts variables	**$**			**54 060 $**
Remblaiage du site ***(Plusieurs composantes)***				**15 987 $**
Excavation et chargement, Excavatrice hydraulique, 2 CY, 75 CY/h (57 m^3/h)	0,76 m3	2,48 $	6454	15 987 $
Essai de respirométrie ***(Plusieurs composantes)***				**410 $**
Location d'un analyseur de gaz (Portatif)	Jour	102,50 $	4	410 $
Analyse des sols ***(Plusieurs composantes)***				**27 111 $**
Sonde ***(Plusieurs modèles)***				**283 $**
pour récupérer le sol, non fendue, 22,2mm x 25,4mm	Chaque	141,67 $	2	283 $
Décontamination des équipements d'échantillonnage ***(Détails)***	Chaque	7,01 $	350	2 452 $
Matériels jetables nécessaires à l'échantillonnage ***(Détails)***	Chaque	7,91 $	70	554 $
Analyse chimiques des sols en laboratoire ***(Plusieurs composantes)***				**23 822 $**
Organiques volatils (SW 5035/SW8260B)	Chaque	183,33 $	70	12 833 $
Diesel (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	123,33 $	70	8 633 $
pH (EPA 9040 / 9041 / 9045)	Chaque	7,56 $	70	529 $
Teneur total en carbone organique (TOC) (EPA 9060)	Chaque	26,10 $	70	1 827 $
Employés, ouvriers et per-diem ***(Plusieurs composantes)***				**10 552 $**
Ouvrier	Heure	16,63 $	300	4 989 $
Mobilisation/Démobilisation 1 personne sur 400 km	Chaque	212,50 $	2	425 $
Per-diem (par personne)	Jour	102,75 $	50	5 138 $
Autres				**246 $**
Coûts variables				**246 $**
Besoin en électricité	KWH	0,05 $	4922	246 $
Fin de la base de données				
Coûts totaux du traitement en excavation et biopile, une année	**$**			**889 944 $**
Coûts fixes	**$**			**700 430 $**
Coûts variables	**$**			**189 514 $**
Proportions des coûts fixes				**100%**
Proportions des coûts variables				**100%**
Durée totale du projet	**AN**		**2,00**	
Coûts totaux du traitement en excavation et biopile, durée totale du projet	**$**			**1 079 458 $**
Densité du sol	**kg/m^3**		**1875**	
Volume de sol traité	**m^3**		**7894,59**	
Coûts totaux du traitement en excavation et biopile, durée totale du projet, par m^3	**\$/m^3**			**137 $**
Coûts totaux du traitement en excavation et biopile, durée totale du projet, par tonne	**$/T**			**73 $**
Proportions des coûts totaux, durée totale du projet				**100,0%**

Références

Enviro Accès (1997). Biodégradation en piles.

Federal Remediation Technologies Roundtable, Environmental Protection Agency, Department of Defense (U.S. Air Force; U.S. Army; U.S. Navy), Department of Energy, Department of Interior, National Aeronautics and Space Administration, Tennessee Valley Authority and Coast Guard. 1998. Guide to Documenting and Managing Cost and Performance Information for Remediation Projetcts. EPA/542/B-98/007. *Federal Remediation Technologies Roundtable*, 77 pp.

Jorgensen, K. S., J. Puustinen and A.-M. Suortti. 2000. Bioremediation of petroleum, hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental Pollution* 107(2): 245-254.

Lei, J., J.-L. Sansregret and B. Cyr. 1994. Biopiles and biofilters combined for soil cleanup. *Pollution Engineering* 26(6): 5658.

Meyers, R. A., Ed. (1998). Encyclopedia of environmental analysis and remediation. Wiley Encyclopedia Series in Environmental Science. New York, Wiley-Interscience.

Reisinger, H. J., S. A. Mountain, G. Andreotti, G. DiLuise, A. Porta, A. S. Hullman, V. Owens, D. Arlotti and J. Godfrey. 1996. Bioremediation of a major inland oil spill using a comprehensive integrated approach. Pages in *Proceedings of the Third International Symposium and Exhibition on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe*, September 10-13. Warsaw, Poland.

U.S. Environmental Protection Agency. 1995. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. EPA/510/B-95/007. *US EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response*, Washington, DC., 363 pp.

von Fahnestock, F. M., G. B. Wickramanayake, R. J. Kratzke and W. R. Major. 1998. Biopile Design , Operation and Maintenance Handbook for Treating Hydrocarbon-Contaminated Soils. Battelle Press, Columbus, 163 pp.

Annexe 3

FICHE TECHNOLOGIQUE

BIOASPIRATION *IN SITU*

Catégorie : Biologique **Type : *in situ***

Description de la technologie

La bioaspiration est une technologie de restauration relativement nouvelle, adaptée des systèmes d'extraction sous vide des eaux souterraines. L'extraction sous vide est une technologie employée depuis longtemps, particulièrement dans le domaine minier et géotechnique. La bioaspiration est simplement une adaptation des systèmes traditionnels de pompage, à la différence qu'elle combine le pompage de l'eau et le pompage de l'air. Dans les formations géologiques peu perméables, le simple pompage de l'eau n'est pas suffisant afin de créer un gradient d'écoulement vers le puits de pompage. L'association avec un pompage d'air, dans les formations peu perméables, permettra de créer un gradient significatif par différence de pression et ainsi surmontera les difficultés associées au pompage en milieu géologique peu perméable (Nyer *et al.*, 1996).

Le système de pompage sous vide fait apparaître un cône de rabattement autour des puits de pompage. Cette diminution locale du niveau d'eau n'est pas désirée lorsque l'extraction de contaminant en phase mobile est réalisée, puisqu'elle peut accentuer significativement l'extension verticale de la contamination (marnage). Le système de bioaspiration évite la formation du cône de rabattement autour des puits de pompage. Cette technologie combine deux systèmes existants, soit le pompage sous vide et la bioventilation (Miller, 1996; Hoeppel *et al.*, 1995). Le système de pompage sous vide est utilisé afin de récupérer les contaminants en phase mobile disposés à la surface de la nappe phréatique. De plus, l'opération du système crée un apport d'oxygène dans la zone vadose, favorisant du même coup la biodégradation des contaminants en phase résiduelle (DeVantier, voir référence; Miller, 1996; Millette et al. 1997).

Le système de bioaspiration est principalement employé dans la restauration des sites au prise avec une contamination en hydrocarbures légers de types LNAPL (« light non aqueous phase liquids »). La Figure A3-1 présente une vue schématique d'un système de bioaspiration.

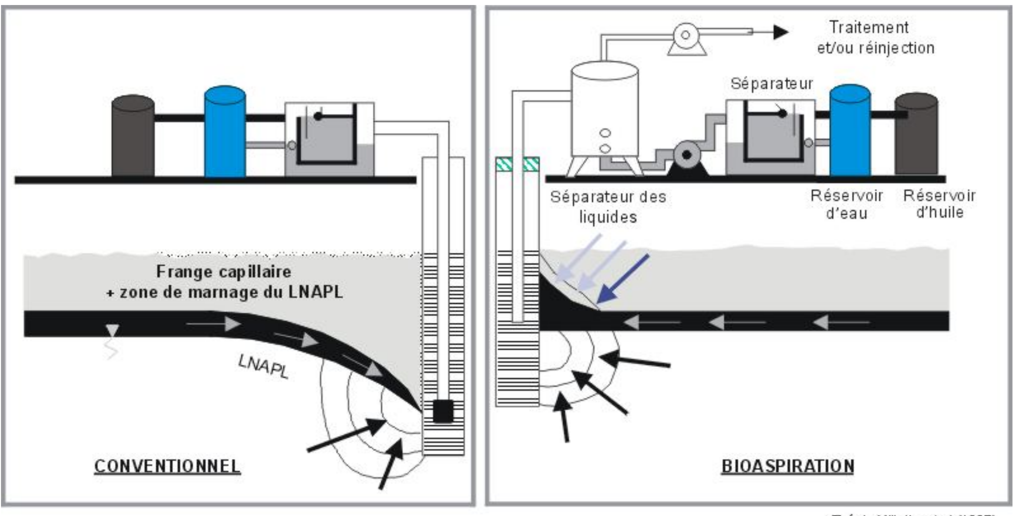


Figure A3-1. Vue schématique d'un système de bioaspiration

Performance

Tout comme pour les technologies desquelles elle est issue, la performance de la bioaspiration *in situ* repose avant tout sur une conception appropriée pour le site à traiter. Le nombre de puits d'extraction (ou d'injection) ainsi que leur emplacement sur le site sont à la base d'une conception favorisant le maximum de biodégradation des contaminants dans le sol. La bioaspiration est une technologie qui est limitée par les conditions hydrogéologiques du milieu dans lequel elle est implantée (Nyer *et al.*, 1996). Il est important de prendre conscience que cette technologie doit être utilisée dans un milieu relativement peu perméable, afin que l'aspiration sous vide soit efficace. Cependant, dans la littérature, des exemples d'utilisation de bioaspiration dans des milieux granulaires plus grossiers ont été rapportés comme fructueux (Ben, 1995, tiré de Miller, 1996). Les sols doivent donc être caractérisés par une perméabilité variant de 10^{-3} à 10^{-5} cm/sec (10^{-8} à 10^{-10} cm^2) afin de rencontrer les conditions optimales de fonctionnement d'un système de bioaspiration (Nyer *et al.*, 1996). D'ailleurs, les systèmes de pompage sous vide se sont démontrés très efficaces dans des aquifères perchés composés d'interlits de sable et argile (Nyer *et al.*, 1996).

En plus du milieu dans lequel cette technologie est appliquée, le type de contaminant devant être récupérer a aussi son importance. Ainsi, cette technique de restauration est particulièrement efficace dans la récupération de contaminants en phase mobile, au-dessus du niveau piézométrique (Miller, 1996). De plus, elle favorise la biodégradation de ces contaminants en phase résiduelle dans les sols de la zone vadose.

Comme pour la plupart des technologies *in situ*, à moins d'avoir des conditions idéales et une connaissance détaillée du site, un essai de terrain à petite échelle (essai-pilote) est généralement recommandé afin d'évaluer la performance d'un système à plus grande échelle.

Critères d'applicabilité

Tableau A3-1. Critères d'applicabilité pour la bioaspiration et plages de valeurs considérées

Paramètres	Valeurs
Perméabilité intrinsèque (k)	> 0,01 darcy (> 10^{-10} cm^2)
	0,001 à 0,01 darcy (10^{-11} à 10^{-10} cm^2)
	0,0001 à 0,001 darcy (10^{-12} à 10^{-11} cm^2)
	< 0,0001 darcy (< 10^{-12} cm^2)
Structure et stratification du sol	Composition uniforme de sable ou gravier
	Composition uniforme de till sableux ou tourbe
	Composition uniforme de silt
	Remblai perméable
	Till sableux contenant des lentilles imperméables (argile)
	Remblai imperméable
	Argile très fracturée
	Roc métamorphique ou igné fracturé
	Argile peu fracturée
	Roc
pH du sol	6,8 à 7,2
	6 à 6,8 ou 7,2 à 8
	5 à 6 ou 8 à 9
	1 à 5 ou 9 à 14
Teneur en humidité du sol	5 à 15 % massique
	15 à 25 % massique
	2 à 5 % massique
	< 2 % ou > 25 % massique
Température du sol	20 à 40 °C
	10 à 20 °C
	5 à 10 ou 40 à 45°C
	< 5 °C ou > 45 °C
Profondeur de la nappe phréatique	> 3,00 mètres
	2,00 à 3,00 mètres
	1,00 à 2,00 mètres
	< 1,00 mètre
Caractéristique du contaminant : phase mobile?	Oui
	non
Structure chimique du contaminant (tension de vapeur)	< 1 mm Hg
	1 à 760 mm Hg
	> 760 mm Hg
Caractéristique du contaminant : Constante de Henry	> 200 atm (20265 bar)
	100 à 200 atm (10135 à 20265 kPa)
	50 à 100 atm (5066 à 10135 kPa)
	20 à 50 atm (2026 à 10135 kPa)
	< 20 atm (< 2026 kPa)
Concentration et toxicité du contaminant (pour les métaux lourds)	< 100 mg/kg
	100 à 500 mg/kg
	500 à 1000 mg/kg
	1000 à 2500 mg/kg
	> 2500 mg/kg

Concentration et toxicité du contaminant (pour les hydrocarbures totaux)	>25 000 mg/kg
	1 000 à 5 000 mg/kg
	5 000 à 10 000 mg/kg
	10 000 à 25 000 mg/kg
	>25 000 mg/kg

Coûts

Basé sur le *Bioslurping Implementation Cost-Estimating Guide* (Battelle, 1998), une unité mobile avec système de bioaspiration coûte aux environs de 21 000 € avec systèmes de traitement d'eau et de gaz optionnels. Le système de bioaspiration pour les essais pilotes coûte aux environs de 35 000 €. Le système complet de bioaspiration implique des coûts de 84 000 € environs. Règle générale, ces coûts vont diminuer avec une augmentation du volume de sol à traiter, principalement en raison d'une répartition sur un plus grand volume de sol des équipements nécessaires et peu importe le volume à traiter. De plus, la majorité des coûts associés au traitement d'un sol par bioaspiration est engendrée dès la première année de traitement puisque les coûts de suivi et de maintenance des équipements peuvent être relativement faibles.

Le tableau A3-2 présente en détail les composantes d'un système de bioaspiration et les coûts unitaires associés, tel que compris dans la base de données Excel.

Tableau A3-2. Base de données des coûts unitaires pour la bioaspiration

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Installation du système				
Coûts fixes				
Forages **(lien: Base de données *Forages, échantillonnage et puits*)**				
Puits d'extraction **(lien: Base de données *Forages, échantillonnage et puits*)**				
Puits de suivi **(lien: Base de données *Forages, échantillonnage et puits*)**				
Pompes ***(Plusieurs composantes)***				
Pompes de contracteur (trash pump) ***Location*** ***(Plusieurs composantes)***				
50,8 mm, 17 m^3/h (2", 75 USGPM)	jour	45,36 $		
76,2 mm, 34 m^3/h (3", 150 USGPM)	jour	46,51 $		
101,6 mm, 68 m^3/h (4", 300 USGPM)	jour	69,60 $		
Pompes à anneaux liquides ***(Plusieurs composantes)***				
Pompe à anneaux liquides, 2,2 kW	Chaque	6 624,00 $		
Pompe à anneaux liquides, 3,5 kW	Chaque	7 727,00 $		
Pompe à anneaux liquides, 5,6 kW	Chaque	9 051,00 $		
Pompe à anneaux liquides, 7,5 kW	Chaque	10 486,00 $		
Pompe à anneaux liquides, 11,2 kW	Chaque	16 555,00 $		
Réservoir à eau scellé pour pompe à anneaux liquides	Chaque	433,99 $		
Séparateur huile/eau, 2 m^3	Chaque	5 976,00 $		
Réservoir à émulsion	Chaque	896,88 $		
Séparateur	Chaque	76,48 $		
Pompes submersibles ***(Plusieurs composantes)***				
Pompe submersible 3,5m^3/h	jour	771,08 $		
Pompe submersible 9,5 m^3/h	jour	771,08 $		
Pompe submersible 12 m^3/h	jour	782,30 $		
Réservoirs ***(Plusieurs composantes)***				
Réservoir d'eau usée hors-terre, polyéthylène, 22700 L, location	mois	600,00 $		
Réservoirs hors-terre en acier (steel sump) + supports/raccords ***(détail)*** ***(en litres)***				
2000	Chaque	1 174,00 $		
3800	Chaque	1 495,00 $		
5700	Chaque	2 104,00 $		
7500	Chaque	2 810,00 $		
19000	Chaque	5 275,00 $		
Réservoirs horizontaux hors-terre, plastique (plastic sump) + raccords NPT ***(détail)*** ***(en litres)***				
30000	Chaque	5 044,00 $		
38000	Chaque	5 954,00 $		
45500	Chaque	6 858,00 $		
57000	Chaque	12 691,00 $		
76000	Chaque	14 141,00 $		
95000	Chaque	22 356,00 $		
Tuyaux, Raccords, Valves ***(Plusieurs composantes)***				
Tubage, tuyaux flexibles ***(Plusieurs composantes)***				
Tuyau flexible, 20 mètres	Chaque	175,00 $		
Tubage PVC, Classe 200, 38,1 mm (1,5 ")	mètre	10,00 $		
Connecteurs en "T" ***(Plusieurs composantes)***				
Té, PVC schedule 40, 31,8mm (1.25")	Chaque	0,82 $		
Té, PVC schedule 40, 51mm (2")	Chaque	1,69 $		
Té, PVC schedule 40, 76,2mm (3")	Chaque	8,38 $		
Té, PVC schedule 40, 101,6mm (4")	Chaque	13,23 $		
Té, PVC schedule 40, 152,4mm (6")	Chaque	19,67 $		
Té en acier inox., 51mm (2")	Chaque	85,90 $		
Té en acier inox., 101,6mm (4")	Chaque	373,60 $		
Té en acier inox., 152,4mm (6")	Chaque	741,00 $		

Tableau A3-2. Base de données des coûts unitaires pour la bioaspiration

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Coudes ***(Plusieurs composantes)***				
Coude 90 degré, PVC schedule 40, 51mm (2")	Chaque	1,37 $		
Coude 90 degré, PVC schedule 40, 76,2mm (3")	Chaque	5,78 $		
Coude 90 degré, PVC schedule 40, 101,6mm (4")	Chaque	8,92 $		
Coude 90 degré, PVC schedule 40, 152,4mm (6")	Chaque	28,35 $		
Coude 90 degré en acier inox., 101,6mm (4")	Chaque	251,40 $		
Coude 90 degrés en acier inox., 152,4mm (6")	Chaque	367,55 $		
Valves ***(Plusieurs composantes)***				
Robinet-vanne (*gate valve*) en bronze 51mm (2")	Chaque	276,93 $		
Robinet à tournant sphérique (*Ball valve*) 51mm (2"), PVC Sch. 80	Chaque	74,84 $		
Robinet à tournant sphérique (*Ball valve*) 101,6mm (4"), PVC Sch. 80	Chaque	237,82 $		
Clapet anti-retour 101,6mm (4")	Chaque	276,13 $		
Clapet anti-retour 152,4mm (6")	Chaque	484,92 $		
Autres ***(Plusieurs composantes)***				
Bride de fixation, PVC schedule 80, 25,4mm (1")	Chaque	6,03 $		
Réducteur 101,6mm x 51mm (4" x 2"), acier inox.-Sch. 40	Chaque	208,40 $		
Réducteur 101,6mm x 51mm (4" x 2"), PVC Sch. 40	Chaque	3,20 $		
Réducteur 152,4mm x 101,6mm (6" x 4"), PVC Sch. 40	Chaque	19,31 $		
Réducteur 203,2mm x 152,4mm (8" x 6"), PVC Sch. 40	Chaque	29,12 $		
Réducteur 254mm x 203,2mm (10" x 8"), PVC Sch. 40	Chaque	98,10 $		
Réducteur 203,2mm x 101,6mm (8" x 4"), PVC Sch. 40	Chaque	31,83 $		
Réducteur 304,8mm x 203,2mm (12" x 8"), PVC Sch. 40	Chaque	132,56 $		
Système de traitement des vapeurs ***(Plusieurs composantes)***				
Biofiltre	Chaque	2 000,00 $		
Filtre au Charbon activé (baril de 200 litres)	Chaque	600,00 $		
Systèmes de suivi ***(Plusieurs composantes)***				
Sondes, thermocouple et système d'acquisition de données ***(Plusieurs composantes)***				
Tube de nylon, 6,3mm Diamètre extérieur	Chaque	0,40 $		
Tube de Teflon, 6,3mm Diamètre extérieur	Chaque	1,95 $		
Capteur en PVC, 25,4mm Diamètre, 152,4mm longueur	Chaque	1,00 $		
Raccord express ("quick connect")	Chaque	17,00 $		
Câble de thermocouple, type K	Chaque	0,80 $		
Prise pour thermocouple	Chaque	5,00 $		
Sonde pH (Détails)	Chaque			
Sonde pH	Chaque	737,31 $		
Câble coaxial pour la sonde à pH, longueur 2,4m	Chaque	88,06 $		
Manomètres et Débitmètres ***(Plusieurs composantes)***				
Débitmètre à hélice 0-75 Pa	Chaque	54,00 $		
Débitmètre à hélice 0-125 Pa	Chaque	47,00 $		
Débitmètre à hélice 0-500 Pa	Chaque	47,00 $		
Débitmètre à hélice 0-2,5 kPa	Chaque	47,00 $		
Compteur d'eau digital	Chaque	222,00 $		
Débitmètre Annubar	Chaque	220,00 $		
Manomètre à vide 0-7,5 kPa	Chaque	192,00 $		
Manomètre à vide 0-2,5 kPa	Chaque	192,00 $		
Manomètre en acier, cadran de 50mm, 0 @ 2000 kPa	Chaque	41,44 $		
Manomètre en laiton, cadran de 50mm, 0 @ 2000 kPa	Chaque	44,08 $		
Manomètre en laiton, cadran de 114mm', 0 @ 2000 kPa	Chaque	90,85 $		
Autres (Plusieurs composantes)				
Abri pour l'équipement	Chaque	750,00 $		
Roulotte de 5 mètres de longueur	Chaque	2 000,00 $		
Système électrique	Chaque	3 000,00 $		
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				

Tableau A3-2. Base de données des coûts unitaires pour la bioaspiration

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Coûts variables				
Système de traitement des vapeurs *(Plusieurs composantes)*				
Charbon activé supplémentaire	m^3	1 320,00 $		
Biofiltre *(Plusieurs composantes)*				
Milieu filtrant- Compost de fumier de poules pondeuses	Chaque	1,52 $		
Milieu filtrant- Tourbe de sphaigne et perlite (80-20 % v/v)	Chaque	2,78 $		
Milieu inerte- Perlite	Chaque	10,03 $		
Employés, ouvriers et per-diem (lien: Base de données *Salaires*				
Opération, suivi et caractérisation				
Coûts fixes				
Analyse des sols (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'eau souterraine (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'effluent gazeux (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Employés, ouvriers et per-diem (lien: Base de données *Salaires)*				
Coûts variables				
Essais et test (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'eau souterraine (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'effluent gazeux (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Employés, ouvriers et per-diem (lien: Base de données *Salaires)*				
Électricité et carburant *(selon type d'équipements du système)*				
Fermeture du site				
Coûts fixes				
Analyse des sols (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'eau souterraine (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'effluent gazeux (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démantèlement des équipements)* (l ien: Base de données *Salaires)*				
Coûts variables				
Essais et test (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'eau souterraine (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Analyse de l'effluent gazeux (lien: Base de données *Analyses et tests)*				
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démantèlement des équipements)* (l ien: Base de données *Salaires)*				
Autres				
Coûts fixes				
Coûts variables				
Fin de la base de données				

Références

Battelle, 1998. *Application Guide for Bioslurping.* Prepared for the Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA. October.

Battelle, 1998. *BSCE version 1.0, Bioslurping Implementation Cost-Estimating Guide,* Battelle, Naval Facilities Engineering Service Center (NFESC).

Hoeppel, R.E., 1998. *Application Guide for Bioslurping Volume I: Summary of the principles and practices of bioslurping,* Technical Memorandum TM-2300-ENV, NFESC, Battelle.

Hoeppel, R.E., 1998. *Application Guide for Bioslurping Volume II: Application Guide for Bioslurping,* Technical Memorandum TM-2301-ENV, NFESC, Battelle.

Hoeppel, R.E., Kittel, J.A., Goetz, F.E., Hinchee, R.E., Abbott, J.E. 1995. *Bioslurping technology applications at naval middle distillate fuel remediation sites*; dans Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons; R. Hinchee, J.A. Kittel, H.J. Reisinger, Ed.; Battelle Press: Columbus, OH; 3(6), p. 389-399.

Leeson, A., Kittel, J.A., Hinchee, R.E., Miller, R.N., Haas, P.E., Hoeppel, R.E. 1995. *Test plan and technical protocol for bioslurping;* dans Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons; R. Hinchee, J.A. Kittel, H.J. Reisinger, Ed.; Battelle Press: Columbus, OH; 3(6), p. 335-347.

Miller, R.R. 1996. *Bioslurping*; TO-96-05; Ground-Water Technologies Analysis Center GWRTAC, 14 pp.

Millette, D., Thibault, R., Charlebois, S., Samson, R., Orban, H.J. 1997. *Bioslurping pilot test in a silty low-permeability soil;* dans Sixth Symposium and Exhibition on Groundwater and Soil Remediation; Palais des Congrès de Montréal, March 18-21, 83-103.

Nyer, E.K., Kidd, D.F., Palmer, P.L., Crossman, T.L., Fam, S., John II, F.J., Boettcher, G., Suthersan, S.S. 1996. *In situ* treatment technology - CRC Press Inc.: Boca Raton, FL; 344 pp.

Wickramanayake, G.B., Kittel, J.A., Place, M.C., Hoeppel, R., Walker, A., Drescher, E., Gibbs, J.T. 1996. *Best practices manual for bioslurping*; TM-2191-ENV; Naval Facilities Engineering Service Center.

Annexe 4

FICHE TECHNOLOGIQUE

BIOBARBOTAGE

Catégorie : Biologique **Type : *in situ***

Description de la technologie

Le biobarbotage est une technologie de restauration *in situ* utilisant les microorganismes indigènes pour biodégrader les contaminants organiques dans la zone saturée. La méthode consiste à injecter de l'oxygène et, si nécessaire, des nutriments, dans la zone saturée de l'aquifère afin d'augmenter l'activité microbienne. Le biobarbotage peut être utilisé pour réduire les concentrations en contaminants dissous dans l'eau souterraine, adsorbés dans le sol sous la nappe ou dans la frange capillaire. Même si les constituants en concentration résiduelle dans la zone vadose peuvent être traités par biobarbotage, la bioventilation est normalement jugée plus efficace (USEPA, 1995).

Le biobarbotage se différencie du barbotage en ce que la technologie favorise davantage la biodégradation des contaminants que leur volatilisation. La technique utilise normalement des débits d'air plus faibles que pour le barbotage. En présence de contaminants volatils, le biobarbotage peut être combiné avec un système d'extraction de vapeurs en zone vadose ou d'un système de bioventilation (DiGiulio, 1995; USEPA, 1995), l'important étant d'optimiser la restauration du panache de contamination tout en s'assurant d'une interception complète des vapeurs, de façon à éviter la migration de vapeurs hors site. Le diesel et le « jet fuel », des hydrocarbures de poids moléculaires intermédiaires, sont les plus susceptibles d'être traités efficacement par le biobarbotage, tandis que les produits plus légers peuvent être traités par barbotage. La figure A4-1 montre une vue schématisée de la technologie.

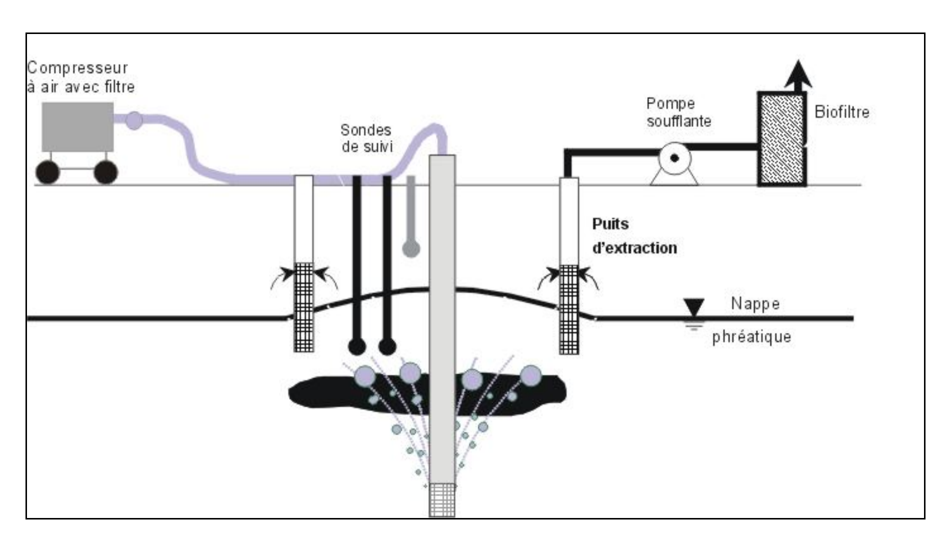


Figure A4-1. Vue schématisée d'un système de biobarbotage

Performance

Tout comme pour les technologies desquelles elle est issue, la performance du biobarbotage repose avant tout sur une conception appropriée pour le site à traiter. Le nombre de puits d'injection (ou d'extraction) ainsi que leur emplacement sur le site sont à la base d'une conception favorisant le maximum de biodégradation des contaminants dans le sol. La performance de la technologie est fortement influencé par les différents critères d'applicabilité présentés à la section suivante. L'efficacité de la technologie dépendra principalement de la perméabilité du sol, déterminante du taux auquel l'oxygène peut être apportée aux microorganismes, et de la biodégradabilité des contaminants qui détermine le taux et le degré de dégradation par les microorganismes (USEPA, 1995).

Par rapport à d'autres technologie *in situ*, les principaux avantages du biobarbotage sont :

- système relativement peu coûteux;
- infrastructure légère, équipement standard;
- peu d'interférences avec les activités du site en surface;
- idéal pour la contamination par l'essence (6-48 mois normalement);
- peu dépendant du climat (utilisable en hiver);
- l'addition de nutriments permet de réduire le temps de restauration;
- de plus en plus documenté du point de vue scientifique;
- technologie éprouvée pour les sols perméables (sables silteux à graviers);
- traitement d'eau en surface non requis;
- le faible taux d'injection d'air minimise les besoins de traitement d'air en surface.

Par contre, la technologie ne fonctionne que selon certaines conditions déterminées (sol perméable et uniforme, aquifère libre, absence de LNAPL) et il existe un potentiel de déplacement des contaminants. De plus, il y a peu de documentation pour confirmer les critères de design et certaines interactions entre les processus physico-chimiques et biologiques ne sont pas bien compris.

Comme pour la plupart des technologies *in situ*, à moins d'avoir des conditions idéales et une connaissance détaillée du site, un essai de terrain à petite échelle (essai-pilote) est généralement recommandé afin d'évaluer la performance d'un système à plus grande échelle, d'autant plus qu'il n'existe aucun standard d'industrie. Le design d'un système de biobarbotage requiert une bonne compréhension des conditions de perméabilité horizontale et verticale du domaine à traiter.

Critères d'applicabilité

Tableau A4-1. Critères d'applicabilité pour le biobarbotage et plages de valeurs considérées

Paramètres	Valeurs
Perméabilité Intrinsèque (k)	> 0,1 darcy (> 10^{-9} cm^2)
	0,01 à 0,1 darcy (10^{-10} à 10^{-9} cm^2)
	0,001 à 0,01 darcy (10^{-11} à 10^{-10} cm^2)
	< 0,001 darcy (< 10^{-11} cm^2)
Structure et stratification du sol	Composition uniforme de sable ou gravier
	Composition uniforme de till sableux ou tourbe
	Composition uniforme de silt
	Remblai perméable
	Till sableux contenant des lentilles imperméables (argile)
	Remblai imperméable
	Argile très fracturée
	Roc métamorphique ou igné fracturé
	Argile peu fracturée
	Roc
pH du sol	6,8 à 7,2
	6 à 6,8 ou 7,2 à 8
	5 à 6 ou 8 à 9
	1 à 5 ou 9 à 14
Teneur en humidité du sol	5 à 15 % massique
	15 à 25 % massique
	2 à 5 % massique
	< 2 % ou > 25 % massique
Température du sol	20 à 40 °C
	10 à 20 °C
	5 à 10 ou 40 à 45°C
	< 5 °C ou > 45 °C
Profondeur de la nappe phréatique	> 3,00 mètres
	2,00 à 3,00 mètres
	1,00 à 2,00 mètres
	< 1,00 mètre
Concentration en fer dissout dans l'eau souterraine	< 10 mg/L
	10 à 20 mg/L
	> 20 mg/L
Caractéristique du contaminant : phase mobile?	Oui
	non
Caractéristique du contaminant : tension de vapeur	< 1 mm Hg (0,133 kPa)
	1 à 760 mm Hg (0,133 à 101,3 kPa)
	> 760 mm Hg (>101,3 kPa)
Caractéristique du contaminant : Point d'ébullition	>350 °C
	300 à 350 °C
	200 à 300°C
	< 200 °C

Critères d’applicabilité (suite)

Tableau A4-1(suite). Critères d’applicabilité pour le biobarbotage et plages de valeurs considérées

Paramètres	Valeurs
Caractéristique du contaminant : Constante de Henry	> 200 atm (20265 bar)
	100 à 200 atm (10135 à 20265 kPa)
	50 à 100 atm (5066 à 10135 kPa)
	20 à 50 atm (2026 à 10135 kPa)
	< 20 atm (< 2026 kPa)
Concentration et toxicité du contaminant (pour les hydrocarbures totaux)	< 5 000 mg/kg
	5 000 à 10 000 mg/kg
	10 000 à 25 000 mg/kg
	25 000 à 50 000 mg/kg
	>50 000 mg/kg
Concentration et toxicité du contaminant (pour les métaux lourds)	< 100 mg/kg
	100 à 500 mg/kg
	500 à 1000 mg/kg
	1000 à 2500 mg/kg
	> 2500 mg/kg

Coûts

Tout comme d’autres technologies *in situ*, les coûts d’application du biobarbotage varie grandement selon l’étendue de la contamination et les caractéristiques du site. Ainsi, la majorité des coûts associés au traitement sera engendrée dès la première année de traitement puisque les coûts de suivi et de maintenance des équipements peuvent être relativement faibles. La plage de coûts peut varier facilement entre 260 000 € et 605 000 € pour un panache de contamination d’un hectare (FRTR, 1998; USEPA, 1995).

Le tableau A4-2 présente en détail les composantes d’un système de biobarbotage et les coûts unitaires associés, tel que compris dans la base de données Excel.

Tableau A4-2. Base de données des coûts unitaires pour le biobarbotage

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Installation du système				
Coûts fixes				
Forages **(lien: Base de données *Forages, échantillonnage et puits*)**				
Puits d'injection et d'extraction **(lien: Base de données *Forages, échantillonnage et puits*)**				
Puits de suivi **(lien: Base de données *Forages, échantillonnage et puits*)**				
Pompes ***(Plusieurs composantes)***				
Systèmes de récupération des vapeurs ***(Plusieurs composantes)***				
0,75 kW, 230 V, 165 m^3/h	Chaque	4 192,00 $		
1,1 kW, 230 V, 215 m^3/h	Chaque	4 560,00 $		
1,5 kW, 230 V, 270 m^3/h	Chaque	5 377,00 $		
1,5 kW, 230 V, 475 m^3/h	Chaque	6 773,00 $		
0,75 kW, 230 V, 165 m^3/h - Location	Semaine	298,00 $		
0,75 kW, 230 V, 165 m^3/h - Location	Mois	829,40 $		
850 m^3/h	Chaque	17 450,00 $		
1700 m^3/h	Chaque	22 450,00 $		
Pompes soufflantes ***(Plusieurs composantes)***				
165 m^3/h, 2,4 kW, 34 kPa	Chaque	4 325,00 $		
290 m^3/h, 7,7 kW, 68 kPa	Chaque	8 314,00 $		
450 m^3/h, 11,1 kW, 103 kPa	Chaque	11 677,00 $		
725 m^3/h, 62,6kW, 206 kPa	Chaque	32 444,00 $		
Remorques ***(Plusieurs composantes)***				
Remorques pour le système d'injection d'air ***(Plusieurs composantes)***				
2,5m x 6m	Chaque	5 370,00 $		
2,5m x 10m	Chaque	7 954,00 $		
2,5m x 6m, location	Mois	153,75 $		
2,5m x 10m, location	Mois	192,70 $		
19000	Chaque	5 275,00 $		
Réservoirs horizontaux hors-terre, plastique (plastic sump) + raccords NPT (litres) ***(détail)***				
30000	Chaque	5 044,00 $		
38000	Chaque	5 954,00 $		
45500	Chaque	6 858,00 $		
57000	Chaque	12 691,00 $		
76000	Chaque	14 141,00 $		
95000	Chaque	22 356,00 $		
Tuyaux, Raccords, Valves ***(Plusieurs composantes)***				
Tubage, tuyaux flexibles ***(Plusieurs composantes)***				
Tuyau flexible, 20 mètres	Chaque	175,00 $		
Tubage PVC, Classe 200, 38,1 mm (1,5 ")	mètre	10,00 $		
Connecteurs en "T" ***(Plusieurs composantes)***				
Té, PVC schedule 40, 31,8mm (1.25")	Chaque	0,82 $		
Té, PVC schedule 40, 51mm (2")	Chaque	1,69 $		
Té, PVC schedule 40, 76,2mm (3")	Chaque	8,38 $		
Té, PVC schedule 40, 101,6mm (4")	Chaque	13,23 $		
Té, PVC schedule 40, 152,4mm (6")	Chaque	19,67 $		
Té en acier inox., 51mm (2")	Chaque	85,90 $		
Té en acier inox., 101,6mm (4")	Chaque	373,60 $		
Té en acier inox., 152,4mm (6")	Chaque	741,00 $		

Tableau A4-2. Base de données des coûts unitaires pour le biobarbotage

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Coudes ***(Plusieurs composantes)***				
Coude 90 degrés, PVC schedule 40, 51mm (2")	Chaque	1,37 $		
Coude 90 degrés, PVC schedule 40, 76,2mm (3")	Chaque	5,78 $		
Coude 90 degrés, PVC schedule 40, 101,6mm (4")	Chaque	8,92 $		
Coude 90 degrés, PVC schedule 40, 152,4mm (6")	Chaque	28,35 $		
Coude 90 degrés en acier inox., 101,6mm (4")	Chaque	251,40 $		
Coude 90 degrés en acier inox., 152,4mm (6")	Chaque	367,55 $		
Valves ***(Plusieurs composantes)***				
Robinet-vanne (*gate valve*) en bronze 51mm (2")	Chaque	276,93 $		
Robinet à tournant sphérique (*Ball valve*) 51mm (2"), PVC Sch. 80	Chaque	74,84 $		
Robinet à tournant sphérique (*Ball valve*) 101,6mm (4"), PVC Sch. 80	Chaque	237,82 $		
Clapet anti-retour 101,6mm (4")	Chaque	276,13 $		
Clapet anti-retour 152,4mm (6")	Chaque	484,92 $		
Autres ***(Plusieurs composantes)***				
Bride de fixation, PVC schedule 80, 25,4mm (1")	Chaque	6,03 $		
Réducteur 101,6mm x 51mm (4" x 2"), acier inox.-Sch. 40	Chaque	208,40 $		
Réducteur 101,6mm x 51mm (4" x 2"), PVC Sch. 40	Chaque	3,20 $		
Réducteur 152,4mm x 101,6mm (6" x 4"), PVC Sch. 40	Chaque	19,31 $		
Réducteur 203,2mm x 152,4mm (8" x 6"), PVC Sch. 40	Chaque	29,12 $		
Réducteur 254mm x 203,2mm (10" x 8"), PVC Sch. 40	Chaque	98,10 $		
Réducteur 203,2mm x 101,6mm (8" x 4"), PVC Sch. 40	Chaque	31,83 $		
Réducteur 304,8mm x 203,2mm (12" x 8"), PVC Sch. 40	Chaque	132,56 $		
Système de traitement des vapeurs ***(Plusieurs composantes)***				
Biofiltre	Chaque	2 000,00 $		
Filtre au Charbon activé (baril de 200 litres)	Chaque	600,00 $		
Systèmes de suivi ***(Plusieurs composantes)***				
Sondes, thermocouple et système d'acquisition de données ***(Plusieurs composantes)***				
Tube de nylon, 6,3mm Diamètre extérieur	Chaque	0,40 $		
Tube de Teflon, 6,3mm Diamètre extérieur	Chaque	1,95 $		
Capteur en PVC, 25,4mm Diamètre, 152,4mm longueur	Chaque	1,00 $		
Raccord express ("quick connect")	Chaque	17,00 $		
Câble de thermocouple, type K	Chaque	0,80 $		
Prise pour thermocouple	Chaque	5,00 $		
Sonde pH (Détails)	Chaque			
Sonde pH	Chaque	737,31 $		
Câble coaxial pour la sonde à pH, longueur 2,4m	Chaque	88,06 $		
Manomètres et Débitmètres ***(Plusieurs composantes)***				
Débitmètre à hélice 0-75 Pa	Chaque	54,00 $		
Débitmètre à hélice 0-125 Pa	Chaque	47,00 $		
Débitmètre à hélice 0-500 Pa	Chaque	47,00 $		
Débitmètre à hélice 0-2,5 kPa	Chaque	47,00 $		
Compteur d'eau digital	Chaque	222,00 $		
Débitmètre Annubar	Chaque	220,00 $		
Manomètre à vide 0-7,5 kPa	Chaque	192,00 $		
Manomètre à vide 0-2,5 kPa	Chaque	192,00 $		
Manomètre en acier, cadran de 50mm, 0 @ 2000 kPa	Chaque	41,44 $		

Tableau A4-2. Base de données des coûts unitaires pour le biobarbotage

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Manomètre en laiton, cadran de 50mm, 0 @ 2000 kPa	Chaque	44,08 $		
Manomètre en laiton, cadran de 114mm', 0 @ 2000 kPa	Chaque	90,85 $		
Autres (Plusieurs composantes)				
Abri pour l'équipement	Chaque	750,00 $		
Roulotte de 5 mètres de longueur	Chaque	2 000,00 $		
Système électrique	Chaque	3 000,00 $		
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				
Coûts variables				
Système de traitement des vapeurs ***(Plusieurs composantes)***				
Charbon activé supplémentaire	m^3	1 320,00 $		
Biofiltre ***(Plusieurs composantes)***				
Milieu filtrant- Compost de fumier de poules pondeuses	Chaque	1,52 $		
Milieu filtrant- Tourbe de sphaigne et perlite (80-20 % v/v)	Chaque	2,78 $		
Milieu inerte- Perlite	Chaque	10,03 $		
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				
Opération, suivi et caractérisation				
Coûts fixes				
Analyse des sols **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Analyse de l'eau souterraine ***(lien: Base de données Analyses et tests)***				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				
Coûts variables				
Essais et test **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Analyse de l'eau souterraine ***(lien: Base de données Analyses et tests)***				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				
Électricité et carburant ***(selon type d'équipements du système)***				
Fermeture du site				
Coûts fixes				
Analyse des sols **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Analyse de l'eau souterraine ***(lien: Base de données Analyses et tests)***				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démantèlement des équipements)* ***(lien: Base de données Salaires)***				
Coûts variables				
Essais et test **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Analyse de l'eau souterraine ***(lien: Base de données Analyses et tests)***				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests)***				
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démantèlement des équipements)* ***(lien: Base de données Salaires)***				
Autres				
Coûts fixes				
Coûts variables				
Fin de la base de données				

Références

American Petroleum Institute, 1996. *In situ Air Sparging.* API Publication 1628D.

DiGiulio, Dominic C., 1995. *Use of a combined air/extraction (CIE) well to minimize vacuum enhanced water recovery.* Proceedings of The Eight National Outdoor Action Conference and Exposition, National Ground Water Association, mai 1995.

Federal Remediation Technologies Roundtable, Environmental Protection Agency, Department of Defence (U.S. Air Force; U.S. Army; U.S. Navy), Department of Energy, Department of Interior, National Aeronautics and Space Administration, Tennessee Valley Authority and Coast Guard. 1998. *Guide to Documenting and Managing Cost and Performance Information for Remediation Projects.* EPA/542/B-98/007. *Federal Remediation Technologies Roundtable*, 77 pp.

Miller, R.R. 1996. *Air Sparging*; TO-96-04; Ground-Water Technologies Analysis Center GWRTAC, 18 pp.

Norris, R.D., Hinchee, R.E., Brown, et al. 1994. *Handbook of Bioremediation*. Boca Raton, FL:CRC Press.

Nyer, E.K., Kidd, D.F., Palmer, P.L., Crossman, T.L., Fam, S., John II, F.J., Boettcher, G., Suthersan, S.S. 1996. *In situ* treatment technology - CRC Press Inc.: Boca Raton, FL; 344 pp.

U.S. Environmental Protection Agency. 1995. *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers*. EPA/510/B-95/007. *US EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response*, Washington, DC., 363 pp.

Annexe 5

FICHE TECHNOLOGIQUE

DÉSORPTION THERMIQUE

Catégorie : Physique **Type : *ex situ***

Description de la technologie

La désorption thermique comme technologie de décontamination *ex situ* est un procédé utilisant directement ou indirectement le transfert de chaleur afin de chauffer suffisamment les contaminants organiques de façon à les volatiliser et à les séparer du milieu solide contaminé. L'air, un gaz combustible ou un gaz inerte sont utilisés comme media de transfert pour les composés volatilisés. Les systèmes de désorption thermique sont des procédés de séparation physiques qui transfèrent les contaminants d'une phase à une autre. Ils ne sont pas conçus pour fournir un haut degré de destruction des contaminants bien que les températures élevées de certains systèmes peuvent mener à une oxydation locale ou à la pyrolyse. La désorption thermique n'est pas synonyme d'incinération, puisque la destruction des contaminants n'est pas l'objectif principal. Les températures atteintes et les temps de résidence utilisés par les systèmes de désorption thermique volatilisent certains contaminants sans les oxyder ou les détruire. La performance de ces systèmes est habituellement mesurée en comparant les niveaux de contamination du matériel non traité avec celui du matériel traité. Typiquement, le matériel contaminé est chauffé entre 150 et 550°C, selon le système choisi (Superfund, EPA/540/S-94/501, Fév. 1994).

De façon générale, on appelle « désorption thermique » le procédé impliquant le chauffage des sols ou des boues (sédiments) à environ 150 à 300°C (basse température), tandis que l'appellation « désorption thermique à haute température » est utilisée lorsque le matériel contaminé est chauffé à des températures entre 300 et 550°C. De nombreux projets de restauration effectués pour le compte de la marine américaine comportent des sols contaminés en benzène, toluène, éthylbenzène, et en xylènes (BTEX) ou encore en hydrocarbures totaux (HCT). Ces composés sont traités facilement et avec succès en utilisant divers types de systèmes de désorption thermique. L'incinération à haute température serait plus coûteuse et n'est pas nécessaire normalement pour ces contaminants (Pal et al., 1998).

Tous les systèmes de traitement thermiques de sol *ex situ* utilisent des systèmes d'alimentation semblables, se composant d'un dispositif de criblage pour séparer et retirer les matériaux de plus de 5 cm, un convoyeur, à bande ou à vis, pour déplacer le sol tamisé des tamis à la première chambre thermique de traitement, et un système de pesée pour contrôler la masse de sol traité.

Performance

Les systèmes de désorption thermique ont des degrés variables d'efficacité selon le type de contaminants organiques. Les groupes de contaminants cibles pour des systèmes à basse température sont les composés organiques volatils (COV) non halogénés et les carburants. La technologie peut être employée pour traiter les composés organiques semi-volatils, mais avec une efficacité réduite. Les systèmes à haute température sont conçus pour traiter les composés organiques semi-volatils, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les biphényles polychlorés et les pesticides. Bien que les COV et les carburants puisses également être traités, la rentabilité du traitement pourrait être plus faible. Des métaux volatils peuvent aussi être enlevés par des systèmes à haute température. La présence de chlore peut affecter la volatilisation de quelques métaux, tel que le plomb. Le processus est applicable pour la séparation des produits organiques des résidus de raffinerie, des goudrons, des résidus des activités de traitement du bois, des sols contaminés à la créosote et aux hydrocarbures, pour les déchets mixtes (dangereux et radioactifs), les pesticides, les résidus de peinture, de même que les résidus des procédés de fabrication de caoutchouc synthétique (Federal Remediation Technologies Roundtable et autres, 1998).

Beaucoup de contracteurs offrent des unités de désorption thermique à basse température montées sur une remorque simple. Les sols sont traités à raison de 13 à 18 tonnes métriques (15 à 20) par heure pour les sols granulaires et moins de 6 tonnes métriques par heure pour des sols argileux, lorsque plus que 10% du matériel passe un tamis 0,075mm (200-mesh). Les unités avec une capacité de 23 à 46 tonnes métriques par heure peut exiger quatre ou cinq remorques pour le transport et 2 jours pour l'installation. Un peu plus de quatre mois sont en moyenne nécessaires pour traiter un site « standard » de 18 200 tonnes métriques par désorption thermique à haute température. Les piles de sols à traiter et le système d'alimentation sont généralement protégés des intempéries pour réduire afin de minimiser l'humidification des sols et d'éviter les problèmes de manutention. L'installation d'un séchoir à l'entrée du système peut être requis pour des sols et des sédiments ayant une teneur en eau supérieure à 20 ou 25% afin de faciliter la manutention et d'augmenter le débit de sols traiter. Une partie des contaminants est volatilisé au séchoir et les vapeurs sont acheminées vers une chambre de traitement thermique. Le tableau A5-1 établit l'efficacité de la désorption thermique pour différents types de contaminants. Quant au tableau A5-1, il présente les critères d'applicabilité de la technologie et la gamme de valeurs considérées.

Tableau A5-1. Efficacité de la désorption thermique pour différents types de contaminants

Groupes de contaminants		Efficacité			
		Sol	Boue	Sédiments	Matériau de filtration
Organiques	Volatils halogénés	1	2	2	1
	Semi-volatils halogénés	1	1	2	1
	Volatils non-halogénés	1	2	2	1
	Semivolatils non-halogénés	1	2	2	1
	BPC	1	2	1	2
	Pesticides	1	2	2	2
	Dioxines/Furanes	1	2	2	2
	Cyanures organiques	2	2	2	2
	Organiques corrosifs	3	3	3	3
Inorganiques	Métaux volatils	1	2	2	2
	Métaux non volatils	3	3	3	3
	Amiantes	3	3	3	3
	Matériaux radioactifs	3	3	3	3
	Cyanures organiques	3	3	3	3
	Organiques corrosifs	3	3	3	3
Réactifs	Oxydants	3	3	3	3
	Réducteurs	3	3	3	3

Notes:
1. Efficacité prouvée: traitement confirmé à certaines échelles
2. Efficacité potentielle: avis d'experts sur l'application de la technologie.
3. Efficacité peu probable: avis d'experts sur la non-applicabilité de la technologie.

Source: US EPA, 1991. Engineering Bulletin: Thermal Desorption Treatment. EPA/540/2- 91/008, de Pal et al. 1998.

Critères d’applicabilité

Tableau A5-2. Critères d’applicabilité pour la désorption thermique et gamme de valeurs considérées

Paramètres	Valeurs
Type de sol (granulométrie et plasticité)	Présence de cailloux ou de blocs
	Sable ou gravier
	Silt
	Silt argileux
	Argile
Teneur en humidité du sol	10 à 25% massique
	5 à 10% ou 25 à 30% massique
	< 5 % ou > 30 % massique
Concentration en matière humique	Forte
	Moyenne
	Faible
	Nulle
Concentration en métaux	Forte
	Moyenne
	Faible
	Nulle
Structure chimique du contaminant (tension de vapeur)	< 1 mm Hg
	1 à 760 mm Hg
	> 760 mm Hg
Concentration et toxicité du contaminant (pour les hydrocarbures totaux)	< 1 000 mg/kg
	1 000 à 5 000 mg/kg
	5 000 à 10 000 mg/kg
	10 000 à 25 000 mg/kg
	>25 000 mg/kg
Point d’ébullition	> 350°C
	200 à 350°C
	100 à 200°C
	< 100°C
K_{ow}	Élevé
	Moyen
	Faible
Solubilité (ou poids moléculaire)	Élevée
	Moyenne
	Faible
Stabilité thermique	Point éclair élevé
	Point éclair moyen
	Point éclair faible
Possibilité de formation des dioxines	Présence de BPC ou autres produits chlorés
	Absence de BPC ou autres produits chlorés
Excavation des sols	Très facile (profondeur < 5 m, accessible)
	Facile (profondeur entre 5 et 10m, accessible)
	Difficile (profondeur >10m, accessible)
	Impraticable (trop profond ou présence d’infrastructure)

Coûts

Les coûts de traitement associés à la désorption thermique des hydrocarbures pétroliers varient généralement entre 50 et 366 € par tonne métrique de sol. De ces coûts, environs 22 à 39 € par tonne métrique sont compris dans les frais d'opération directs. Le transport et l'installation de l'unité sont de l'ordre de 3,66 à 6,11 € par tonne métrique, souvent excédant les coûts de mobilisation de 222 000 €. L'excavation des sols contaminés et le remplacement par des sols propres coûtent approximativement 7 à 12 € la tonne métrique.

Le tableau A5-3 présente en détail les composantes d'un système de désorption thermique et les coûts unitaires associés, tel que compris dans la base de données Excel.

Tableau A5-3. Base de données des coûts unitaire pour la désorption thermique (basse température)

Description	Unité	Prix/unité Total	Quantité	Prix Total
Installation du système				
Coûts fixes				
Préparation des sols *(Plusieurs composantes)*				
Tamis vibrant *(Plusieurs composantes)*				
Tamis vibrant de 1,2m x 3,6m avec 1 plateau (incluant le moteur et les accessoires)	Chaque	19 316,00 $		
Tamis vibrant de 1,5m x 5m avec 2 plateau (incluant le moteur et les accessoires)	Chaque	29 615,00 $		
Tamis vibrant de 1,8m x 6m avec 3 plateau (incluant le moteur et les accessoires)	Chaque	26 822,00 $		
Tamis vibrant de 2,1m x 7,3m avec 3 plateau (incluant le moteur et les accessoires)	Chaque	29 543,00 $		
Acheminement des sols *(Plusieurs composantes)*				
Convoyeurs *(Plusieurs composantes)*				
Convoyeur à courroi automatique horizontal de 12,5m de long, 60cm de large	Chaque	4 874,00 $		
Convoyeur à courroi automatique horizontal de 18,75m de long, 60cm de large	Chaque	6 357,00 $		
Convoyeur à courroi incliné de 10m de long, 60cm de large	Chaque	6 760,00 $		
Désorption thermique basse température: mod./démob. + ingénierie *(Plusieurs composantes)*				
Sols contaminés par COV et essence *(Plusieurs composantes)*				
entre 500 et 5000 tonnes	Chaque	15 375,00 $		
entre 5001 et 50000 tonnes	Chaque	102 500,00 $		
> 50000 tonnes	Chaque	512 500,00 $		
Sols contaminés par composés organiques semi-volatils *(Plusieurs composantes)*				
entre 500 et 5000 tonnes	Chaque	102 500,00 $		
entre 5001 et 50000 tonnes	Chaque	512 500,00 $		
> 50000 tonnes	Chaque	1 573 500,00 $		
Systèmes de suivi *(Plusieurs composantes)*				
Autres				
Employés, ouvriers et per-diem *(lien: Base de données Employés)*				
Coûts variables				
Préparation des sols *(Plusieurs composantes)*				
Chargeurs *(Plusieurs composantes)*				
Chargeur 910, 1.25 CY	Heure	56,85 $		
Chargeur 916, 1.5 CY	Heure	65,53 $		
Chargeur 926, 2 CY	Heure	69,38 $		
Chargeur 950, 3 CY	Heure	81,88 $		
Chargeur 966, 4 CY	Heure	95,45 $		
Chargeur 980, 5.25 CY	Heure	136,50 $		
Chargeur 988, 7 CY	Heure	181,98 $		
Chargeur 992, 13.5 CY	Heure	307,60 $		
Broyeurs/déchiqueteurs *(Plusieurs composantes)*				
Déchiqueteur de barils (portable, 60-100 barils/heure)	semaine	10 763,00 $		
Déchiqueteur de barils (portable, 60-100 barils/heure)	jour	2 153,00 $		
Déchiqueteur de barils (portable, 60-100 barils/heure)	mois	43 050,00 $		
Mob-démob pour le déchiqueteur de barils (portable)	Chaque	1 600,00 $		
Broyeur électrique (50-75 tonnes/heure) - coût de location pour les mois additionnels	mois	18 000,00 $		
Désorption thermique basse température: contrat de services *(Plusieurs composantes)*				
Sols de faible humidité: COV et essence *(Plusieurs composantes)*				
entre 500 et 2500 tonnes	Tonne	76,88 $		
entre 2501 et 5000 tonnes	Tonne	61,50 $		
entre 5001 et 10000 tonnes	Tonne	41,00 $		
entre 10001 et 50000 tonnes	Tonne	30,75 $		
> 50000 tonnes	Tonne	20,50 $		

Tableau A5-3. Base de données des coûts unitaire pour la désorption thermique (basse température)

Description	Unité	Prix/unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Sols de faible humidité: composés organiques semi-volatils ***(Plusieurs composantes)***				
entre 500 et 2500 tonnes	Tonne	153,75 $		
entre 2501 et 10000 tonnes	Tonne	128,13 $		
entre 10001 et 50000 tonnes	Tonne	76,88 $		
> 50000 tonnes	Tonne	51,25 $		
Autres				
Filtre-presse pour la diminution de l'humidité du sol	Tonne	49,00 $		
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				
Opération, suivi et caractérisation				
Coûts fixes				
Analyse des sols **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Analyse de l'eau souterraine ***(lien: Base de données Analyses et tests)***				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				
Coûts variables				
Essais et test **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Employés, ouvriers et per-diem ***(lien: Base de données Salaires)***				
Électricité et carburant ***(selon type d'équipements du système)***				
Fermeture du site				
Coûts fixes				
Analyse des sols **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Analyse de l'eau souterraine ***(lien: Base de données Analyses et tests)***				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démantèlement des équipements)* ***(l ien: Base de données Salaires)***				
Coûts variables				
Essais et test **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Analyse de l'eau souterraine ***(lien: Base de données Analyses et tests)***				
Analyse de l'effluent gazeux **(lien: Base de données *Analyses et tests*)**				
Employés, ouvriers et per-diem *(inclus le démantèlement des équipements)* ***(l ien: Base de données Salaires)***				
Autres				
Coûts fixes				
Coûts variables				
Fin de la base de données				

Références

USEPA, 1992. *A Citizen's Guide to Thermal Desorption*, EPA, OSWER, Washington, DC, EPA/542/F-92/006.

USEPA, 1992. *Low Temperature Thermal Treatment (LT3) System*, Demonstration Bulletin, Washington, DC, EPA/540/MR-92/019.

USEPA, 1992. *Ogden Circulating Bed Combustor McCall Superfund Site*, EPA RREL, Technology Evaluation, EPA/540/R-92/001; and Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-92/001.

USEPA, 1992. *Roy F. Weston, Inc. Low Temperature Thermal Treatment (LT3) System*, EPA RREL, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-92/019; and Applications Analysis, EPA/540/AR-92/019.

USEPA, 1993. *Low Temperature Thermal Aeration (LTTA) System, Canonie Environmental Services, Inc.*, EPA RREL, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-93/504.

USEPA, 1993. *X-TRAX Model 100 Thermal Desorption System Chemical Waste Management*, EPA RREL, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-93/502.

USEPA, 1994. *Thermal Desorption System, Clean Berkshires, Inc.*, EPA RREL, Demonstration Bulletin, EPA/540/MR-94/507; and Capsule, EPA/540/R-94/507a.

USEPA, 1997. *Best Management Practices (BMPs) for Soil Treatment Technologies: Suggested Operational Guidelines to Prevent Cross-media Transfer of Contaminants During Clean-UP Activities*, EPA OSWER, EPA/530/R-97/007.

Federal Remediation Technologies Roundtable, 1995. *Remediation Case Studies: Thermal Desorption, Soil Washing, and In Situ Vitrification*, EPA/542/R-95/005.

Pal, D., Fann, S., Wight, S., 1998. *Application guide for Thermal desorption systems.* Naval Facilities Engineering Service Center, rapport technique TR-2090-ENV, 256 pp.

Annexe 6

Les tableaux A6-1 et A6-2 présentent les coûts unitaires pour les opérations de forage et d'installation de puits (piézomètres), les analyses physiques, chimiques et microbiologiques des sols, des eaux souterraines ou des gaz, ainsi que les coûts reliés aux divers tests permettant de recueillir d'avantage d'informations sur les caractéristiques du site à l'étude. Ces bases de données seraient communes à diverses technologies, en plus de permettre de constituer la source d'information principale pour la base de données temporaire pour l'acquisition de données supplémentaires sur le site. Le tableau A6-3 présente les coûts rattachés aux salaires du personnel requis pour les diverses opérations de restauration ou de caractérisation et constitue donc une base de données source commune à la conception de toutes les technologies.

Tableau A6-1. Coûts unitaires de forage, d'installation de puits et d'échantillonnage

Description	Unité	Prix/ unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Forages				
Forage à la boue *(Détails)*				- $
Diamètre de forage 101,6 mm (4"), Profondeur <= 30 m	mètre	21,85 $		- $
Diamètre de forage 101,6 mm (4"), Profondeur > 30 m	mètre	23,93 $		- $
Diamètre de forage 152,4 mm (6"), Profondeur <= 30m	mètre	21,85 $		- $
Diamètre de forage 152,4 mm (6"), 30 < Profondeur <= 150 m	mètre	20,81 $		- $
Diamètre de forage 152,4 mm (6"), Profondeur > 30 m	mètre	21,85 $		- $
Diamètre de forage 203,2 mm (8"), Profondeur <= 30 m	mètre	32,77 $		- $
Diamètre de forage 203,2 mm (8"), 30 < Profondeur <= 150 m	mètre	28,61 $		- $
Diamètre de forage 203,2 mm (8"), Profondeur > 150 m	mètre	30,69 $		- $
Forage rotatif à la tarière tige (vrille) creuse *(Détails)*				- $
Diamètre de forage 203,2 mm (8"), Profondeur <= 30 m	mètre	54,63 $		- $
Diamètre de forage 203,2 mm (8"), Profondeur > 30 m	mètre	75,10 $		- $
Diamètre de forage 279,4 mm (11"), Profondeur <= 30 m	mètre	85,33 $		- $
Diamètre de forage 349,3 mm (13-3/4"), Profondeur <= 30 m	mètre	98,98 $		- $
Autres types de forage *(Détails)*				- $
Forage à l'air, 152,4 mm (6") diam. (consolidé), prof. < 30m	mètre	81,92 $		- $
Forage à l'air, 254 mm (10") diam. (non-consolidé), 30 < prof. < 150m	mètre	136,55 $		- $
Décontamination (*Plusieurs composantes*)				**- $**
Équipement lourd	Chaque	239,48 $		- $
Tour de forage, Foreuse, Grille, Location à la journée *(Détails)*	Jour	131,17 $		- $
Savon Alconox	*Chaque*	*16,17 $*		*- $*
Décontamination: Tour de forage, Foreuse, Grille, Location à la journée	*Jour*	*115,00 $*		*- $*
Équipement de tranchée et de forage	Chaque	102,13 $		- $
Surface par pression d'eau, 105 SF/H	0,08 m2	0,88 $		- $
Autres (*Plusieurs composantes*)				**- $**
Déplacement de l'équipement de forage sur le site	Chaque	311,70 $		- $
Baril de 200 litres our les déblais de forage et l'eau contaminée	Chaque	76,48 $		- $
Puits (piézomètres)				
Tuyau plein, longueur de 3 m*(Plusieurs composantes)*				**- $**
Diamètre 50,8 mm (2"), PVC Schedule 40	mètre	23,23 $		- $
Diamètre 101,6 mm (4"), PVC Schedule 40	mètre	37,65 $		- $
Diamètre 152,4 mm (6"), PVC Schedule 40	mètre	40,22 $		- $
Diamètre 203,2 mm (8"), PVC Schedule 40	mètre	54,94 $		- $
Diamètre 50,8 mm (2"), Acier inox no.304	mètre	66,24 $		- $
Diamètre 101,6 mm (4"), Acier inox. no.304	mètre	109,60 $		- $
Tuyau crépiné, longueurs de 3 m (Plusieurs composantes)				**- $**
Diamètre 50,8 mm (2") PVC Schedule 40	mètre	33,31 $		- $
Diamètre 101,6 mm (4"), PVC Schedule 40	mètre	57,44 $		- $
Diamètre 152,4 mm (6"), PVC Schedule 40	mètre	74,05 $		- $
Diamètre 203,2 mm (8"), PVC Schedule 40	mètre	103,35 $		- $
Diamètre 50,8 mm (2"), Acier inox. no.304	mètre	56,14 $		- $
Diamètre 101,6 mm (4"), Acier inox. no. 304	mètre	109,60 $		- $
Bouchon *(Plusieurs composantes)*				**- $**
Bouchon de fond, diamètre 50,8 mm (2"), PVC	Chaque	14,01 $		- $
Bouchon de fond, diamètre 101,6 mm (4"), PVC	Chaque	33,89 $		- $
Bouchon de fond, diamètre 152,4 mm (6"), PVC	Chaque	76,62 $		- $
Bouchon de fond, diamètre 203,2 mm (8"), PVC	Chaque	91,79 $		- $
Bouchon de fond, diamètre 50,8 mm (2"), Acier inox. no.304	Chaque	54,01 $		- $
Bouchon de fond, diamètre 101,6 mm (4"), Acier inox. no.304	Chaque	80,98 $		- $
Sable de silice No 2 *(Plusieurs composantes)*				**- $**

Tableau A6-1. Coûts unitaires de forage, d'installation de puits et d'échantillonnage

Description	Unité	Prix/ unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Équivalent pour puits de 50,8 mm (2") de diamètre	mètre	7,78 $		- $
Équivalent pour puits de 101,6 mm (4") de diamètre	mètre	13,72 $		- $
Équivalent pour puits de 152,4 mm (6") de diamètre	mètre	19,90 $		- $
Ciment Portland ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Équivalent pour puits de 50,8 mm (2") de diamètre	mètre	0,97 $		- $
Équivalent pour puits de 101,6 mm (4") de diamètre	mètre	1,46 $		- $
Équivalent pour puits de 152,4 mm (6") de diamètre	mètre	8,28 $		- $
Équivalent pour puits de 203,2 mm (8") de diamètre	mètre	11,69 $		- $
Joint de bentonite (Joint annulaire) (Plusieurs composantes)				**- $**
Équivalent pour puits de 50,8 mm (2") de diamètre	Chaque	32,52 $		- $
Équivalent pour puits de 101,6 mm (4") de diamètre	Chaque	56,17 $		- $
Équivalent pour puits de 152,4 mm (6") de diamètre	Chaque	82,77 $		- $
Équivalent pour puits de 203,2 mm (8") de diamètre	Chaque	110,36 $		- $
Dalle de béton en surface ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Dalle de béton, 1,20m x 1,20m x 0,10m	Chaque	158,58 $		- $
Dalle de béton, 0,60m x 0,60m x 0,10m	Chaque	101,94 $		- $
Couvercle de puits ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Couvercle de trou-d'homme, étanche à l'eau, avec serrure, 20cm x 19cm	Chaque	152,23 $		- $
Couvercle de trou-d'homme, étanche à l'eau, avec serrure, 30cm" x 19cm"	Chaque	201,78 $		- $
Échantillonnage des sols ***(Plusieurs composantes)***				
Foreuse manuelle (location)	Jour	12,50 $		- $
Foreuse mécanique avec assemblage (location)	Jour	16,94 $		- $
Décontamination des équipements d'échantillonnage ***(Détails)***	Chaque	7,01 $		- $
Eau déonisée	Litre	9,72 $		- $
Savon Alconox	Chaque	4,04 $		- $
Matériels jetables nécessaires à l'échantillonnage ***(Détails)***	Chaque	7,91 $		- $
Gants de latex (Boite de 100)	Chaque	0,30 $		- $
Pot en verre clair de 1 litre (32 oz) (Boite de 12)	Chaque	3,94 $		- $
Ruban (rouleau)	Chaque	0,63 $		- $
Feuille de plastique (rouleau)	Chaque	2,05 $		- $
Isopropanol	Litre	2,02 $		- $
Sac de glace	Chaque	0,37 $		- $
Échantillonnage de l'eau souterraine ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Valve Waterra (D32)	Chaque	27,00 $		- $
Tubage Waterra en HDPE	30 m	20,00 $		- $
Pompe Waterra électrique	Chaque	2 800,00 $		- $
Tubage d'échantilonnage pour les composés volatils	24	20,00 $		- $
Sonde multiparamètres YSI	Chaque	4 000,00 $		- $
Échantillonneur jetable à bille	Chaque	11,00 $		- $
Échantillonnage de l'effluent gazeux ***(Plusieurs composantes)***				
Échantillonneur en continu avec mesure du débit d'air	Chaque	5 000,00 $		- $
pour vapeur de gaz, acier inox., enfoncement manuel, bout non récupérable	Chaque	127,63 $		- $
pour vapeur de gaz, acier inox., enfoncement mécanique, bout récupérable	Chaque	296,50 $		- $
Collecte et analyse des vapeurs dans le sol	Jour	95,00 $		- $
Sonde d'analyse des sols in situ ***(Plusieurs composantes)***				
pour récupérer le sol, non fendue, 22mm x 300mm	Chaque	141,67 $		- $
pour récupérer le sol, non fendue, 22mm x 600mm ou 29mm x 300mm	Chaque	160,00 $		- $
pour vapeur de gaz, acier inox., enfoncement mécanique, bout récupérable	Chaque	296,50 $		- $

Tableau A6-2. Coûts unitaires des analyses et des tests

Description	Unité	Prix/unité	Quantité	Prix
		Total		Total
Indicateur de niveau d'eau dans un puits ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Câble polyéthylène, longueur de 30m (Location)	Jour	23,06 $		- $
Câble polyéthylène, longueur de 30m (Location)	Mois	58,94 $		- $
Essais et test ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Essai de pompage (par puits)	Chaque	6 949,00 $		- $
Essai de traçage	Heure	338,72 $		- $
Essai de pompage pneumatique (par puits)	Chaque	3 383,00 $		- $
Test de pompage hydraulique (par puits)	Chaque	1 702,00 $		- $
Test de coloration	Chaque	6 406,00 $		- $
Test de perméabilité, pression constante (ASTM D2432)	Chaque	178,33 $		- $
Test de perméabilité, pression décroissante (EPA-9100)	Chaque	236,67 $		- $
Analyseur de gas (trace) (Location)	Mois	981,25 $		- $
Teneur en humidité du sol, conforme à la méthode ASTM D2216	Chaque	21,85 $		- $
Analyse des sols ***(Plusieurs composantes)***				
Analyses grossières des sols en laboratoire ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Analyse de sol *(Détails)*	Chaque	1 036,30 $		- $
Solides totaux (EPA 160.3)	Chaque	11,86 $		- $
Carbone organique total (EPA 415.1,9060)	Chaque	26,10 $		- $
Métaux (EPA 200.7)	Chaque	458,64 $		- $
Pesticides/Herbicides (8081, 8151A)	Chaque	310,00 $		- $
Souffre (Parr Bomb): ASTM D129	Chaque	97,50 $		- $
Cyanures totaux, (9010B) Spectrophotometrique	Chaque	53,33 $		- $
Mercure (EPA 7470/7471)	Chaque	40,00 $		- $
Azote, Nitrate/Nitrite (EPA 300.0/SM4110B)	Chaque	31,31 $		- $
pH, Electrometric (9045)	Chaque	7,56 $		- $
Analyse des caractéristiques géotechniques *(Détails)*	Chaque	154,65 $		- $
Taille des grains (No. 200 Sieve) ASTM D421	Chaque	113,60 $		- $
Humidité	Chaque	17,49 $		- $
Densité	Chaque	16,00 $		- $
pH, Electrometrique (9045)	Chaque	7,56 $		- $
Analyse chimiques des sols en laboratoire ***(Plusieurs composantes)***				
BTEX (Aromatique purgeable) (SW 5035/SW 8021B Aromatiques)	Chaque	73,75 $		- $
BTEX / Hydrocarbone (sans préparation) (Mod. 8021B)(PID/FID)	Chaque	96,67 $		- $
Organiques volatils (SW 5035/SW8260B)	Chaque	183,33 $		- $
HAP (sans préparation) (SW 8310)	Chaque	107,63 $		- $
Diesel (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	123,33 $		- $
Essence (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	95,00 $		- $
Profil des hydrocarbures (avec préparation) (Mod 8015B)(GC/FID)	Chaque	200,00 $		- $
Hydrocarbures totaux (SW 5030/SW 8015B) (EPA 9074)	Chaque	59,19 $		- $
Organiques semi-volatils (avec préparation) (GC/MS)(SW 8270C)	Chaque	270,00 $		- $
pH (EPA 9040 / 9041 / 9045)	Chaque	7,56 $		- $
Teneur total en carbone organique (TOC) (EPA 9060)	Chaque	26,10 $		- $
Huiles et graisses récupérables (EPA 9070)	Chaque	47,50 $		- $
Huiles et graisses récupérables, méthode d'extraction (EPA9071A)	Chaque	50,00 $		- $
Nitrate (EPA 9210)	Chaque	30,31 $		- $
Analyse microbiologique des sols en laboratoire ***(Plusieurs composantes)***				**- $**
Microtox	Chaque	325,00 $		- $
Compte d'hétérotrophes totaux	Chaque	82,50 $		- $
Dégradeurs d'hydrocarbures	Chaque	30,00 $		- $
Analyse de l'eau souterraine ***(Plusieurs composantes)***				
Conductivité (EPA 120.1)	Chaque	13,67 $		- $
pH (EPA 150.1)	Chaque	8,31 $		- $
Turbidité (EPA 180.1)	Chaque	11,63 $		- $
Coliformes fécaux (EPA9222B)	Chaque	25,67 $		- $
DBO5 (EPA 405.1)	Chaque	33,08 $		- $

Tableau A6-2. Coûts unitaires des analyses et des tests

Description	Unité	Prix/unité	Quantité	Prix
		Total		Total
DCO (EPA (410.4)	Chaque	25,33 $		- $
Carbone organique total (EPA 415.1, 9060)	Chaque	26,10 $		- $
Halogènes organiques totaux (tox) (EPA 9022)	Chaque	75,88 $		- $
COV (SW 5030B/SW 8015B)	Chaque	110,00 $		- $
BTEX (mod EPA 602)	Chaque	80,00 $		- $
HAP (SW 3510C/SW8310)	Chaque	188,33 $		- $
Pesticides/BPC (SW3510C/SW8081/8082)	Chaque	206,67 $		- $
Hydrocarbures pétroliers C10-C50	Chaque	60,00 $		- $
Azote total Kjeldahl (NTK)	Chaque	30,00 $		- $
Nitrates, nitrites	Chaque	30,00 $		- $
Phosphore total	Chaque	30,00 $		- $
Métaux (25, selon SW 3005A/SW 6010B)	Chaque	283,33 $		- $
Arsenic (avec préparation) (SW7060A)	Chaque	29,00 $		- $
Mercure (avec préparation) (SW7470)	Chaque	41,61 $		- $
Plomb (avec préparation) (SW3005A/SW7421)	Chaque	41,67 $		- $
Dioxines (avec préparation) (1613A0	Chaque	737,00 $		- $
Analyse des gaz dans le sol en laboratoire *(Plusieurs composantes)*				**- $**
Collecte et analyse des vapeurs dans le sol	Jour	95,00 $		- $
Sac Tedlar (un constituant) (5041/8260B)	Chaque	100,00 $		- $
BTEX (TO-14)	Chaque	80,00 $		- $
BTEX/ Hydrocarbures pétroliers volatils totaux (5041 / 8021B / 8015B)	Chaque	80,00 $		- $
Semi-volatils (TO-13)	Chaque	230,50 $		- $
Hydrocarbures / BTEX (NIOSH 1500)	Chaque	80,67 $		- $
HAP (NIOSH 5515)	Chaque	203,33 $		- $

Tableau A6-3. Base de données des salaires horaires du personnel

Description	Salaires horaires
Gestionnaire de projet (Sénior)	45,01 $
Gestionnaire de projet	41,52 $
Ingénieur Sénior	34,05 $
Ingénieur de projet	26,51 $
Ingénieur	24,78 $
Scientifique Sénior	34,19 $
Scientifique de projet	25,21 $
Scientifique	20,67 $
Secrétaire	13,24 $
Commis de bureau	13,11 $
Dessinateur	17,19 $
Assembleur de tuyaux (vapeur)	33,50 $
Assembleur de tuyaux (vapeur) (Apprenti)	26,80 $
Assembleur de tuyaux (vapeur) (Contremaître)	35,50 $
Camionneur, équipement léger	22,35 $
Camionneur, équipement lourd	22,80 $
Charpentier	28,15 $
Charpentier (Contremaître)	30,15 $
Conducteur de camion lourd	22,80 $
Conducteur de camion, extérieur, léger	22,35 $
Conducteur de camion, lourd	22,80 $
Électricien	33,00 $
Électricien (Contremaître)	35,00 $
Electricien extérieur	33,00 $
Finisseur de ciment	27,00 $
Opérateur de machinerie extérieure, moyenne	28,85 $
Opérateur de machinerie extérieure, moyenne (Contremaître)	30,85 $
Opérateur de machinerie légère	27,65 $
Opérateur de machinerie, Grue avec pelle (Crane/Shovel)	29,90 $
Opérateur de machinerie, moyenne	28,85 $
Opérateur de machinerie, moyenne (Contremaître)	30,85 $
Opérateur de machinerie, Pelle	29,90 $
Opérateur d'équipement, léger	27,65 $
Opérateur d'équipement, moyen	28,85 $
Opérateur d'équipement, moyen, apprenti	23,10 $
Ouvrier extérieur semi-qualifié	24,77 $
Ouvrier semi-qualifié	22,25 $
Plombier	33,25 $
Plombier (Apprenti)	26,60 $
Plombier (Contremaître)	35,25 $
Plombier extérieur	33,25 $
Plombier extérieur (Contremaître)	35,35 $
Rodmen, Reinforcing (Installateur de tige renforcée)	31,50 $
Rodmen, Reinforcing (Installateur de tige renforcée) (Contremaître)	33,50 $
Travailleur de feuilles de métal	32,55 $
Travailleur de feuilles de métal (Apprenti)	26,05 $

Tableau A6-3. Base de données des salaires horaires du personnel

Description	Salaires horaires
Travailleur de feuilles de métal (Contremaître)	34,55 $
Travailleur habilité (*Skilled Worker*)	28,75 $
Travailleur habilité (*Skilled Worker*) (Contremaître)	30,75 $
Tuyauteur	33,50 $
Tuyauteur (Apprenti)	26,80 $
Tuyauteur (Contremaître)	35,50 $

Annexe 7

Tableau A7-1 Information sur les scénarios composant la stratégie optimale, valeur marchande du site, durée de la restauration non limitée

Scénario	Rang	Probabilité		Valeur		Durée	
		Occurrence	Cumulative	Scénario	Probabiliste	Scénario	Totale
Sop-18	1	45,337%	45,337%	325 348,69 €	147 503,95 €	3	1,36
Sop-16	2	14,844%	60,181%	389 675,35 €	57 844,21 €	2	0,30
Sop-41	3	10,594%	70,775%	263 197,33 €	27 882,29 €	4	0,42
Sop-20	4	5,575%	76,350%	263 197,33 €	14 674,27 €	4	0,22
Sop-17	5	5,258%	81,608%	325 348,69 €	17 106,78 €	3	0,16
Sop-39	6	3,654%	85,263%	325 348,69 €	11 889,16 €	3	0,11
Sop-19	7	2,453%	87,716%	263 197,33 €	6 457,39 €	4	0,10
Sop-29	8	1,552%	89,268%	325 348,69 €	5 049,62 €	3	0,05
Sop-60	9	1,549%	90,817%	203 147,70 €	3 146,19 €	5	0,08
Sop-40	10	1,352%	92,169%	263 197,33 €	3 558,84 €	4	0,05
Sop-43	11	1,347%	93,516%	203 147,70 €	2 736,93 €	5	0,07
Sop-4	12	0,979%	94,495%	389 675,35 €	3 813,08 €	2	0,02
Sop-50	13	0,772%	95,267%	263 197,33 €	2 032,45 €	4	0,03
Sop-22	14	0,580%	95,847%	203 147,70 €	1 177,84 €	5	0,03
Sop-58	15	0,540%	96,387%	263 197,33 €	1 420,22 €	4	0,02
Sop-42	16	0,520%	96,906%	203 147,70 €	1 055,97 €	5	0,03
Sop-21	17	0,429%	97,335%	203 147,70 €	871,36 €	5	0,02
Sop-31	18	0,226%	97,561%	263 197,33 €	593,63 €	4	0,01
Sop-59	19	0,218%	97,779%	203 147,70 €	443,64 €	5	0,01
Sop-14	20	0,198%	97,977%	456 253,45 €	901,56 €	1	0,00
Sop-62	21	0,196%	98,173%	145 128,74 €	284,33 €	6	0,01
Sop-75	22	0,191%	98,364%	145 128,74 €	277,77 €	6	0,01
Sop-67	23	0,182%	98,546%	203 147,70 €	369,76 €	5	0,01
Sop-6	24	0,149%	98,695%	325 348,69 €	484,04 €	3	0,00
Sop-45	25	0,141%	98,836%	145 128,74 €	205,30 €	6	0,01
Sop-52	26	0,105%	98,942%	203 147,70 €	214,26 €	5	0,01
Sop-44	27	0,102%	99,044%	145 128,74 €	148,05 €	6	0,01
Sop-61	28	0,077%	99,121%	145 128,74 €	112,10 €	6	0,00
Sop-37	29	0,066%	99,187%	389 675,35 €	257,93 €	2	0,00
Sop-28	30	0,064%	99,251%	325 348,69 €	207,12 €	3	0,00
Sop-73	31	0,063%	99,314%	203 147,70 €	127,17 €	5	0,00
Sop-24	32	0,058%	99,372%	145 128,74 €	84,82 €	6	0,00
Sop-49	33	0,056%	99,428%	263 197,33 €	147,66 €	4	0,00
Sop-23	34	0,047%	99,475%	145 128,74 €	67,96 €	6	0,00
Sop-30	35	0,042%	99,517%	263 197,33 €	111,36 €	4	0,00
Sop-63	36	0,040%	99,557%	-115 211,95 €	-45,58 €	6	0,00
Sop-76	37	0,039%	99,595%	-115 211,95 €	-44,53 €	6	0,00
Sop-51	38	0,029%	99,625%	203 147,70 €	59,23 €	5	0,00
Sop-46	39	0,029%	99,653%	-115 211,95 €	-32,91 €	6	0,00
Sop-33	40	0,027%	99,680%	203 147,70 €	54,58 €	5	0,00

Scénario	Rang	Probabilité		Valeur		Durée	
		Occurrence	Cumulative	Scénario	Probabiliste	Scénario	Totale
Sop-85	41	0,027%	99,707%	-115 211,95 €	-30,92 €	6	0,00
Sop-80	42	0,026%	99,733%	145 128,74 €	38,00 €	6	0,00
Sop-69	43	0,024%	99,757%	145 128,74 €	34,66 €	6	0,00
Sop-74	44	0,022%	99,779%	145 128,74 €	31,81 €	6	0,00
Sop-8	45	0,019%	99,798%	263 197,33 €	50,00 €	4	0,00
Sop-5	46	0,019%	99,817%	325 348,69 €	61,07 €	3	0,00
Sop-66	47	0,017%	99,834%	203 147,70 €	34,48 €	5	0,00
Sop-56	48	0,016%	99,850%	325 348,69 €	53,13 €	3	0,00
Sop-27	49	0,016%	99,865%	389 675,35 €	60,62 €	2	0,00
Sop-3	50	0,014%	99,880%	389 675,35 €	55,66 €	2	0,00
Sop-32	51	0,013%	99,893%	203 147,70 €	26,92 €	5	0,00
Sop-25	52	0,012%	99,905%	-115 211,95 €	-13,60 €	6	0,00
Sop-54	53	0,012%	99,917%	145 128,74 €	17,10 €	6	0,00
Sop-2	54	0,010%	99,926%	456 253,45 €	43,80 €	1	0,00
Sop-68	55	0,008%	99,934%	145 128,74 €	11,68 €	6	0,00
Sop-48	56	0,008%	99,942%	325 348,69 €	25,82 €	3	0,00
Sop-7	57	0,007%	99,949%	263 197,33 €	18,98 €	4	0,00
Sop-53	58	0,007%	99,957%	145 128,74 €	10,35 €	6	0,00
Sop-84	59	0,006%	99,963%	145 128,74 €	9,02 €	6	0,00
Sop-81	60	0,005%	99,968%	-115 211,95 €	-6,09 €	6	0,00
Sop-70	61	0,005%	99,973%	-115 211,95 €	-5,56 €	6	0,00
Sop-88	62	0,004%	99,977%	-115 211,95 €	-4,37 €	6	0,00
Sop-90	63	0,003%	99,980%	-115 211,95 €	-3,82 €	6	0,00
Sop-79	64	0,003%	99,983%	145 128,74 €	3,97 €	6	0,00
Sop-35	65	0,003%	99,985%	145 128,74 €	3,92 €	6	0,00
Sop-55	66	0,002%	99,988%	-115 211,95 €	-2,74 €	6	0,00
Sop-71	67	0,002%	99,990%	263 197,33 €	6,20 €	4	0,00
Sop-34	68	0,002%	99,992%	145 128,74 €	3,16 €	6	0,00
Sop-10	69	0,002%	99,994%	203 147,70 €	4,15 €	5	0,00
Sop-65	70	0,002%	99,996%	263 197,33 €	5,00 €	4	0,00
Sop-9	71	0,001%	99,998%	203 147,70 €	2,81 €	5	0,00
Sop-91	72	0,001%	99,998%	-375 552,65 €	-3,00 €	6	0,00
Sop-36	73	0,001%	99,999%	-115 211,95 €	-0,63 €	6	0,00
Sop-82	74	0,000%	99,999%	203 147,70 €	0,59 €	5	0,00
Sop-78	75	0,000%	100,000%	203 147,70 €	0,56 €	5	0,00
Sop-12	76	0,000%	100,000%	145 128,74 €	0,28 €	6	0,00
Sop-11	77	0,000%	100,000%	145 128,74 €	0,27 €	6	0,00
Sop-13	78	0,000%	100,000%	-115 211,95 €	-0,04 €	6	0,00
Sop-87	79	0,000%	100,000%	145 128,74 €	0,04 €	6	0,00
Sop-89	80	0,000%	100,000%	145 128,74 €	0,04 €	6	0,00
Sop-1	81	0,000%	100,000%	456 253,45 €	0,00 €	1	0,00
Sop-15	82	0,000%	100,000%	389 675,35 €	0,00 €	2	0,00
Sop-26	83	0,000%	100,000%	389 675,35 €	0,00 €	2	0,00
Sop-38	84	0,000%	100,000%	325 348,69 €	0,00 €	3	0,00

Scénario	Rang	Probabilité		Valeur		Durée	
		Occurrence	Cumulative	Scénario	Probabiliste	Scénario	Totale
Sop-47	85	0,000%	100,000%	325 348,69 €	0,00 €	3	0,00
Sop-57	86	0,000%	100,000%	263 197,33 €	0,00 €	4	0,00
Sop-64	87	0,000%	100,000%	263 197,33 €	0,00 €	4	0,00
Sop-72	88	0,000%	100,000%	203 147,70 €	0,00 €	5	0,00
Sop-77	89	0,000%	100,000%	203 147,70 €	0,00 €	5	0,00
Sop-83	90	0,000%	100,000%	145 128,74 €	0,00 €	6	0,00
Sop-86	91	0,000%	100,000%	145 128,74 €	0,00 €	6	0,00
Total		100,000%			313 793,14 €		3,19
Écart-type				158 477,92 €			
Indice de risque				50,5%			

Résumé

Lorsqu'il y a connaissance d'une contamination sur un site et une nécessité de traiter ce dernier, le processus de sa réhabilitation débute par l'identification de l'approche à suivre pour le décontaminer. S'il est relativement simple de fixer l'objectif de réhabilitation, selon l'usage du site par exemple, l'identification de l'atteinte de cet objectif l'est beaucoup moins. En effet, cette atteinte est soumise à des incertitudes associées au site et à la technologie utilisée. Dans le premier cas, bien que différentes méthodes mathématiques permettent de calculer une concentration moyenne sur le site, cette dernière sera empreinte d'une incertitude associée à une caractérisation incomplète du site en raison d'un nombre limité d'échantillons et de l'hétérogénéité du site. Dans le second cas, l'efficacité de nombreuses technologies de réhabilitation est influencée par le site, le contaminant et la concentration de ce dernier. Il est ainsi possible qu'une technologie ne garantisse pas à 100 % l'atteinte de l'objectif de réhabilitation. Dans un tel cas, comment prédire le niveau résiduel de contamination sur le site après l'application de la technologie ? Dans l'optique de maximiser le succès d'une réhabilitation, il devient nécessaire de prendre en considération ces deux formes d'incertitudes lors de la sélection de la séquence de technologies à utiliser pour traiter un site.

Ce rapport conclue la seconde phase du projet ayant pour objectif principal le développement d'un outil d'aide à la gestion des sites contaminés en considérant les risques économiques: le logiciel SITE VII. Lors de la première phase de ce projet, la Chaire industrielle CRSNG en assainissement et gestion des sites de l'École Polytechnique de Montréal a développé le modèle d'évaluation technique et économique optimisant la restauration d'un site (*METEORS*). Ce modèle a été positionné au centre de la structure de l'outil d'aide à la gestion qui a également été pensée lors de cette première phase.

Les objectifs de cette seconde phase du projet étaient le développement du logiciel et la mise en place de bases de données économiques adaptées aux contextes belges et français de même que la mise à jour des bases de données économiques adaptées au contexte nord-américain.

Il est à noter qu'entre la production du rapport intermédiaire de cette seconde phase et le présent document, l'avancement du projet a touché en exclusivité la programmation du logiciel; les concepts, l'architecture du logiciel et des différents modules le composant ayant déjà été définis lors de la première phase du projet ou durant la première moitié de la seconde phase. À défaut de produire un rapport exposant un tel avancement, il a été jugé pertinent faire une mise à jour du rapport intermédiaire de la phase 2 (mai 2003) et de joindre à ce rapport le manuel d'utilisation du logiciel SITE VII (contenant lui-même le disque d'installation du logiciel). La lecture du présent rapport permet une mise en contexte du projet de même qu'une présentation des différents modules requis par le logiciel, tandis que le manuel d'utilisation permet, en plus d'apprendre le fonctionnement du logiciel, de prendre connaissance de l'ensemble du travail accompli.

Mots-clés: Traitement des sites contaminés; outils de gestion, analyse économique

Keywords: Site remediation; decision support system, economic analysis

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des équations

Liste des annexes

Avant-propos

Ce rapport final présente les grands résultats de ce projet de même que les différentes considérations y ayant conduit. Puisque entre le rapport intermédiaire de la seconde phase du projet (mai 2003) et la fin de celui-ci, les activités de recherche ont été dédiées à la programmation du logiciel, les responsables du projet ont choisi de mettre l'emphase sur le produit final (le logiciel et son manuel d'utilisation) et de faire, à titre de rapport final, une mise à jour du rapport intermédiaire. Ainsi, le livrable final du projet consiste en deux documents : ce rapport final et le manuel d'utilisation du logiciel contenant un disque d'installation de toutes les composantes du logiciel SITE VII.

1. Introduction

Le choix d'une technologie de réhabilitation d'un site contaminé peut être guidé par différents facteurs, qu'ils soient environnementaux, économiques, temporels, réglementaires, sociaux, voire même par l'expérience de l'exécutant des travaux. Le succès de l'application de la technologie retenue, c'est-à-dire l'atteinte des objectifs de réhabilitation, est lié quant à lui aux paramètres chimiques, géologiques, hydrogéologiques et physiques du site de même qu'aux conditions d'opération de cette technologie. Or, les valeurs de ces paramètres sont plus souvent qu'autrement partiellement connues du décideur. Une caractérisation préliminaire du site aura permis d'évaluer l'étendue de la contamination et de dresser le portrait du site (modèle conceptuel du site), mais en raison de l'hétérogénéité d'un site et d'un nombre limité de points de caractérisation, la connaissance exacte de l'état du site est bien souvent impossible. C'est donc sur ce fond de connaissances imparfaites que l'évaluation des différentes technologies envisageables pour restaurer le site est habituellement faite. La prise de décisions dans ce contexte amène bien souvent des dépassements budgétaires dus à des temps de réhabilitation plus grands que prévus.

La Chaire industrielle CRSNG en assainissement et gestion des sites, de l'École Polytechnique de Montréal (ci-après nommé la Chaire), développe depuis neuf ans une expertise dans le développement d'outils d'aide à la gestion des sites contaminés. Les aboutissants de ce savoir-faire ont permis la conception de la série de logiciels *SITE*. Devant la difficulté d'établir un choix judicieux en matière de technologies de réhabilitation des sites, l'Association RE.CO.R.D. a mandaté la Chaire en 2000 afin qu'elle lui développe un outil de gestion intégrant les risques économiques pour la réhabilitation des sites contaminés. En novembre 2001, la Chaire terminait la première partie de ce mandat, soit le développement d'un modèle de prise de décision basé sur des critères techniques et économiques, la création de bases de données économiques (adaptées au contexte nord-américain) associées à cinq technologies de réhabilitation et le développement d'une structure pour un logiciel (SITE VII) permettant d'identifier la meilleure stratégie de réhabilitation d'un site selon différents critères et contraintes.

Par la suite, la Chaire s'est vue confiée, par l'Association RE.CO.R.D. de même que par Bell Canada et Hydro-Québec, le mandat de réaliser le logiciel abordé lors de la première phase du projet. Le mandat de cette seconde phase, d'une durée d'un an, comprend :

1. La production du logiciel SITE VII permettant, suite à une saisie de données définissant le site à traiter et les contraintes du traitement, d'indiquer au gestionnaire du site la stratégie optimale à employer pour restaurer le site.
2. La création de bases de données économiques (similaires à celles développées lors de la première phase) adaptées aux contextes français et belge. Les technologies associées à ces bases de données sont l'aspiration (*slurping*), le biobarbotage (*biosparging*), la biopile (biotertre), la bioventilation (*bioventing*) et la désorption thermique.

2. Rappel des réalisations

Lors de la première phase de ce projet, la Chaire a adapté et développé différents éléments essentiels à la réalisation et à l'utilisation du logiciel SITE VII. Le modèle de prise de décision technico-économique *METEORS*, les bases de données économiques nord-américaines et la structure du logiciel en sont trois exemples. Ils sont brièvement repris dans cette section afin de mettre en perspective le travail réalisé durant la seconde phase. La fin de cette section aborde les réalisations de la première moitié de cette seconde phase.

Le contexte entourant le choix d'une technologie de réhabilitation est soumis à différentes sources d'incertitudes quant à l'atteinte des objectifs de réhabilitation. L'incertitude sur le niveau initial de contamination de même que l'utilisation d'une technologie dont l'efficacité n'est pas de 100 % entraînent une incertitude quant au niveau final de contamination résultant de l'application de cette technologie. Afin d'étudier l'éventail des chemins possibles pour atteindre différents niveaux de contamination, un modèle de prise de décision a été développé. METEORS (*Modèle d'évaluation technique et économique optimisant la restauration d'un site*) permet d'identifier, à chaque période, la technologie qui maximise les bénéfices (minimise les coûts) associés à la réhabilitation d'un site. Une des particularités de ce modèle est qu'il considère la possibilité de réduire l'incertitude au sujet du niveau réel de contamination du site et ce, avant de choisir une technologie; et que le choix d'une technologie est influencé par les technologies utilisées précédemment sur le site. Ce modèle a déjà fait l'objet de deux publications scientifiques (voir Bage *et al.* 2002; Bage *et al.* 2003). Pour de plus amples détails au sujet de ce modèle, se référer aux articles énumérés précédemment ou à la section 1 (*Présentation du modèle technico-économique à la base de l'outil*) du rapport final de la phase I (*Rapport CDT P2699 – Développement d'un outil de gestion intégrant les risques économiques pour la réhabilitation des sites contaminés- Phase I*) remis à l'Association RE.CO.R.D. en octobre 2001.

La variable suivie dans *METEORS* pour discerner entre deux ou plusieurs technologies est de nature économique. Les coûts d'application (fixes et récurrents) d'une technologie font parties de cette variable. Afin d'attribuer une valeur à ces coûts d'application pour chaque technologie considérée, des bases de coûts unitaires ont été développées pour différents éléments entrant dans l'installation du système de traitement, son opération et son suivi, la fermeture du site et dans toute autre activité associée à la technologie. Les coûts totaux (fixes et récurrents) pour chaque technologie sont obtenus en sommant les produits entre les coûts unitaires des éléments et leurs quantités requises par la technologie. Le rapport final de la phase I de ce projet contient les éléments et leurs coûts unitaires (en dollars canadiens) regroupés par technologie.

Finalement, le dernier élément faisant partie du rapport final de la phase I est la structure décisionnelle de l'outil de gestion, soit l'assise de cette seconde phase. Le développement de cette structure a permis d'établir les besoins en données pour le modèle, l'ordre de traitement de ces données (construction de l'arborescence et résolution de ce dernier) de même que l'ensemble des résultats intermédiaires et finaux qu'il serait possible de communiquer à l'utilisateur.

Suite aux résultats de cette première phase, la Chaire a entrepris, en novembre 2002, la seconde phase du projet. Les deux objectifs principaux de cette seconde phase étaient la mise en place des bases de données économiques unitaires européennes et la programmation du logiciel. Dès le mi-mandat de cette seconde phase, les bases de données économiques (nord-américaines et européennes) étaient complétées et disponibles en format Microsoft Excel®. Pour ce qui était de la programmation du logiciel, l'emphase a été mise sur la création d'un algorithme permettant d'utiliser le modèle METEORS dans le logiciel SITE VII.

Un tel algorithme a été développé en scindant la résolution du modèle en deux. La première partie de l'algorithme consiste à construire le réseau de toutes les occurrences possibles à partir

du contexte initial (état initial du site) et des considérations de l'utilisateur (technologies sélectionnées). La seconde partie résout à rebours cet arbre de décision en ne conservant, à chaque nœud décisionnel, que les branches maximisant la valeur économique de la réhabilitation. Il est à noter que le modèle METEORS exige une transposition des objectifs de réhabilitation en valeurs économiques (valeurs du site), permettant ainsi la maximisation d'une seule variable (la valeur de la réhabilitation) tout en considérant à la fois les aspects techniques et économiques de la réhabilitation.

3. Modifications par rapport à la proposition initiale

Deux modifications ont été apportées à la proposition initiale présentée le 25 novembre 2002 à l'Association RE.CO.R.D.

La première modification est issue d'une demande faite par l'Association RE.CO.R.D. lors de cette présentation et concernant le traitement de l'incertitude dans le logiciel SITE VII. Un document explorant différentes avenues pour analyser cette incertitude a été produit et soumis à l'Association RE.CO.R.D. en janvier 2003 (*Étude complémentaire- Traitement de l'incertitude dans le logiciel SITE VII*). Suivant la recommandation de cette étude, un module de différenciation (discernement) des choix (décisionnels et technologiques) a été ajouté aux modules requis pour une première version du logiciel SITE VII. Grâce à ce module, l'utilisateur peut spécifier une différence relative minimale entre les valeurs de deux choix pour qu'une préférence puisse être établie entre eux. Cette étude complémentaire et l'ajout du module de discernement ont entraîné une augmentation des coûts de développement du logiciel de 1 400 $ (environ 860 €). Cette augmentation a été absorbée par la Chaire. Aucun impact sur la durée du projet n'a eu lieu suite à cette modification.

La seconde modification concerne l'équipe de réalisation de ce logiciel. Il était proposé initialement que la programmation du logiciel soit réalisée à même les ressources de l'École Polytechnique de Montréal (un stagiaire ou un étudiant de premier cycle). Après réévaluation de la séquence et de l'échéancier des différentes tâches à réaliser pour atteindre les objectifs de cette seconde phase, il a été jugé plus pertinent de programmer le logiciel à même les ressources internes de la Chaire et d'embaucher un stagiaire en génie logiciel lorsque l'ensemble des modules à programmer seraient définis. Ce changement aura permis notamment, de démarrer la programmation de certaines parties du logiciel avant que toutes les tâches de pré-programmation ne soient complétées. Ainsi, l'interface du logiciel a par exemple été pensée et adaptée au fur et à mesure que les tâches de saisies de données étaient réalisées. Cette modification n'a entraîné aucune variation quant aux coûts et à la durée de développement du logiciel.

4. Hypothèses et valeurs par défaut à la base du logiciel SITE VII

Les hypothèses et les valeurs par défaut à la base du logiciel SITE VII sont exposées dans cette section. Il est primordial que tout utilisateur du logiciel accepte ces hypothèses, afin qu'il soit en accord avec la logique du logiciel et ses réponses. Après une simulation, certaines de ces hypothèses sont présentées à l'utilisateur à même le logiciel afin qu'il les accepte.

4.1. Hypothèses générales

- Le logiciel SITE VII concerne les milieux contaminés au diesel (ou par des hydrocarbures pétroliers ayant les propriétés du diesel). L'établissement des efficacités des technologies a été réalisé en considérant ce type de contamination.
- *METEORS* étant un modèle multi-périodes, il est nécessaire d'établir une durée standard et unique pour chaque période à l'étude. La durée d'une période de réhabilitation est établie à une année de traitement.
- L'utilisation du logiciel est précédée d'une première caractérisation du site. Ceci implique que l'utilisateur est en mesure de définir le site à réhabiliter. Cette hypothèse permet dès le début d'évaluer l'état du site avec les données connues. Cette hypothèse représente un cas couramment rencontré en réhabilitation des sites. En effet, la prise de décision d'étudier les avenues possibles pour réhabiliter un site doit être basée sur une information révélant une contamination du site.
- La source de contamination à l'origine de la contamination des sols sur le site a été retirée avant le début de la réhabilitation. Cette hypothèse ne s'applique toutefois pas au cas d'une phase flottante. En effet, SITE VII est en mesure de prendre en considération la présence d'une phase flottante d'hydrocarbures pétroliers lors de l'établissement de la stratégie de réhabilitation du site.
- L'acquisition d'informations supplémentaires permet de connaître avec certitude la véritable situation du site (niveau de contamination). Cette acquisition est considérée par le logiciel comme étant une quantité supplémentaire de stations à mesurer sur le site. Cette quantité est automatiquement calculée par le logiciel selon l'état du site au moment de la prise de décision.
- Le logiciel ne génère qu'une seule stratégie de réhabilitation (par milieu de contamination, zone vadose, zone saturée (eaux souterraines) ou phase libre) pour l'ensemble du site. La responsabilité revient donc à l'utilisateur de définir, en saisissant les stations de caractérisation, la zone pour laquelle il désire obtenir une stratégie de réhabilitation. Cette zone de réhabilitation est également réputée être de forme rectangulaire.
- Les situations (plages de contamination) définissant l'ensemble des valeurs que peut prendre le niveau de contamination du site doivent former une séquence continue. C'est-à-dire que la borne supérieure d'une situation doit correspondre à la borne inférieure de la situation suivante. De plus, toutes situations doivent être distinctes; elles ne doivent pas se chevaucher.
- Au minimum, deux situations (plages de contamination) doivent être définies. La concentration moyenne initiale du site se situe dans la situation représentant les concentrations les plus grandes alors que la concentration associée à l'objectif de réhabilitation se situe dans la situation représentant les concentrations les plus faibles. Cette situation la plus faible doit être bornée inférieurement par une concentration nulle

(0). L'utilisateur peut définir au besoin différentes situations comprises entre ces deux extrêmes. Il faut toutefois noter que le temps de simulation est fonction, notamment, de la quantité de situations possibles définissant le site. L'utilisateur aura donc intérêt à ne définir que des situations ayant une signification économique ou réglementaire par exemple.

4.2. Hypothèses concernant les technologies de réhabilitation

4.2.1. Générales

- La diminution de la masse en contaminant pour les trois technologies biologiques (biobarbotage, biopile et bioventilation) se fait par dégradation biologique aérobie.
- La récupération de la phase libre (si besoin il y a) a prépondérance sur le traitement des zones vadose et saturée (eaux souterraines) (si nécessaire).
- Le traitement de la zone saturée (eaux souterraines) n'est possible que lorsque la zone vadose est exempte de contamination ou a déjà fait l'objet d'un traitement.
- Pour les technologies biologiques (biobarbotage, biopile et bioventilation), la présence d'une microflore adaptée au contaminant (diesel) agit à titre de paramètre d'applicabilité ultime. C'est-à-dire que s'il n'y a pas de microflore adaptée au diesel, les technologies biologiques ne sont pas applicables. Dans le cas de l'ignorance de la présence d'une telle microflore, il n'y a pas rejet des ces technologies.

4.2.2. Aspiration

- L'aspiration est une technologie réversible. C'est-à-dire que suite à son utilisation, l'ensemble des technologies possibles n'est pas réduit par rapport à l'ensemble initial.
- L'aspiration est requise dès qu'il y a présence d'une phase libre de contaminant. Il est supposé que cette phase libre est entièrement récupérée durant la première année d'utilisation de la technologie.
- Durant la récupération de la phase libre, bien qu'une aération de la zone vadose puisse avoir lieu, il n'y a pas de réduction de la masse de contamination autre que celle de la phase libre.
- L'aspiration peut être transformée, suite à la récupération de la phase libre la première année, en un système de bioventilation. Ceci permet la réutilisation, en tout ou en partie, des composantes de cette première technologie. Ainsi et si besoin il y a, il peut s'avérer économiquement avantageux d'avoir recours à la bioventilation suite à l'utilisation de l'aspiration. Dans un tel cas, il est de la responsabilité de l'utilisateur de définir quels équipements pourront servir à la seconde technologie et ainsi ne pas être inclus dans la quantification des coûts du traitement de la zone vadose par bioventilation.

4.2.3. Biobarbotage

- Le biobarbotage est une technologie réversible. C'est-à-dire que suite à son utilisation, l'ensemble des technologies possibles n'est pas réduit par rapport à l'ensemble initial. Néanmoins, le biobarbotage étant la seule technologie considérée dans le logiciel SITE VII pour le traitement des eaux souterraines; l'ensemble des technologies applicables n'est composé que du biobarbotage.

- Le taux annuel moyen d'enlèvement par biobarbotage d'une contamination aux hydrocarbures pétroliers est de 50 %. Des taux d'enlèvement supérieurs à cette moyenne sont possibles, mais rares. Ainsi, un traitement nécessitant plus de 50 % d'enlèvement par année aura une faible probabilité de réussite (réduction de l'efficacité maximale de la technologie).
- Le taux annuel maximal d'enlèvement par biobarbotage d'une contamination aux hydrocarbures pétroliers est de 95 %. Pour des taux annuels d'enlèvement supérieurs à cette valeur, l'efficacité de la technologie est nulle.

4.2.4. Bioventilation

- La bioventilation est une technologie réversible. C'est-à-dire que suite à son utilisation, l'ensemble des technologies possibles pour le traitement de la zone vadose n'est pas réduit par rapport à l'ensemble initial.
- Le taux annuel moyen d'enlèvement par bioventilation d'une contamination aux hydrocarbures pétroliers est de 50 %. Des taux d'enlèvement supérieurs à cette moyenne sont possibles, mais rares. Ainsi, un traitement nécessitant plus de 50 % d'enlèvement par année aura une faible probabilité de réussite (réduction de l'efficacité maximale de la technologie).
- Le taux annuel maximal d'enlèvement par bioventilation d'une contamination aux hydrocarbures pétroliers est de 95 %. Pour des taux annuels d'enlèvement supérieurs à cette valeur, l'efficacité de la technologie est nulle.

4.2.5. Biopile

- Le traitement par excavation et biopile est irréversible. Ceci signifie qu'il est impossible d'utiliser toute technologie *in situ*, pour le traitement de la zone vadose, une fois qu'un traitement en biopile a été amorcé.
- En raison de son caractère *ex situ*, des ajustements aux paramètres d'un sol sont possibles afin que les conditions optimales du traitement soient atteintes. Ainsi, l'efficacité du traitement en biopile est de 100 %.
- En plus de la vitesse de biodégradation des hydrocarbures pétroliers dans une biopile, d'autres paramètres affectent la durée totale du traitement de l'ensemble du sol contaminé. Lorsqu'il s'agit d'un traitement sur site, la superficie disponible limitera le nombre de biopiles qui peuvent être construites. Ainsi, il pourrait être nécessaire d'opérer l'aire de traitement en séquence, c'est-à-dire plusieurs fois de suite pour que le volume total de sol soit traité. Lorsqu'il s'agit de l'envoi des sols dans un centre de traitement, il est possible de considérer le traitement comme complété (du moins du point de vue du site à réhabiliter) lorsque tout le volume de sol a été excavé. Ainsi, le lieu du traitement a une influence sur la durée de ce dernier. Il est donc de la responsabilité de l'utilisateur de spécifier la durée du traitement, lorsqu'il établit les coûts de traitement du sol par biopile. Cette distinction de la durée du traitement n'est possible que si l'utilisateur spécifie lui-même les coûts de traitement (non utilisation des bases de données économiques). Dans le cas d'une utilisation de ces bases de données économiques, le traitement en biopile est considéré comme ayant lieu dans un centre de traitement et durant une seule année. Dans un tel cas, n'ayant pas à faire de distinction entre les coûts fixes et les coûts variables, les coûts unitaires de traitement sont donnés sous une base massique.

- Le traitement par excavation et biopile est impossible dès qu'il y a présence d'infrastructures sur le site; ces dernières limitant l'excavation des sols.

4.2.6. Désorption thermique

- Le traitement par désorption thermique est irréversible puisqu'il nécessite l'excavation des sols. Ceci signifie qu'il est impossible d'utiliser toute technologie *in situ*, pour le traitement de la zone vadose, une fois qu'un traitement en désorption thermique a été amorcé.
- En raison de son caractère *ex situ*, des ajustements aux paramètres d'un sol sont possibles afin que les conditions optimales du traitement soient atteintes. Ainsi, l'efficacité du traitement par désorption thermique est de 100 %.
- La durée du traitement par désorption thermique est intimement liée aux équipements utilisés. Ainsi, si l'utilisateur établit lui-même les coûts fixes et variables du traitement, il devra spécifier la durée totale du traitement. Dans le cas d'une utilisation des bases de données économiques unitaires, le traitement est réputé durer une seule année. Tout comme pour le traitement en biopile, cette durée d'une année permet d'utiliser des coûts unitaires massiques dans les bases de données économiques.
- Le traitement par désorption thermique est impossible dès qu'il y a présence d'infrastructures sur le site.

5. Éléments à la base du logiciel

Dans ce chapitre, les éléments principaux nécessaires à la base du logiciel SITE VII sont présentés. Il y est question de la transposition du modèle METEORS en un algorithme programmable, des bases de données économiques fournies avec le logiciel, de la définition de l’état du site, de l’établissement des efficacités des technologies et de l’évaluation de la qualité des données. Les éléments touchant directement l’utilisation du logiciel ont été omis dans ce chapitre puisqu’ils sont couverts en détails dans le manuel d’utilisation du logiciel SITE VII fourni avec ce rapport.

5.1. Algorithme traduisant le modèle METEORS

Lors du démarrage de cette seconde phase du projet, il avait été souligné que la condition *sine qua non* pour la réalisation du logiciel était la création d’un algorithme permettant l’utilisation du modèle *METEORS*. La grande difficulté de la résolution de ce modèle est l’identification des points de départ, c’est-à-dire les concentrations finales puisque le modèle se résout à rebours. En effet, puisque ces concentrations dépendent des technologies utilisées, il est difficile, voire impossible, de fixer un tel point de départ et de retracer les technologies permettant d’atteindre ce point. Devant cette difficulté et suite à des discussions avec des spécialistes en systèmes d’aide à la décision à l’École Polytechnique de Montréal de même qu’à l’Université de Montréal, il a été retenu de faire précéder l’algorithme *METEORS* d’un algorithme permettant de générer l’ensemble des combinaisons de technologies respectant les contraintes temporelles et techniques. Cette façon de procéder permet, au sens figuré, de générer l’arbre de l’ensemble des décisions possibles (Figure 5-1a). Les extrémités de toutes les branches de cet arbre représentent ainsi toutes les concentrations finales qu’il est possible d’atteindre selon les diverses combinaisons des technologies permises. La connaissance de ce nombre fini de concentrations finales permet alors d’appliquer un algorithme résolvant le modèle *METEORS*. Cette seconde portion correspond, au sens figuré, à remonter à rebours l’arbre de décision en ne conservant, à chaque nœud de décision, que la branche maximisant la valeur de la réhabilitation du site (Figure 5-1b). Ces deux étapes permettent d’obtenir la stratégie optimale de réhabilitation du site, soit la solution du modèle *METEORS* (Figure 5-1c).

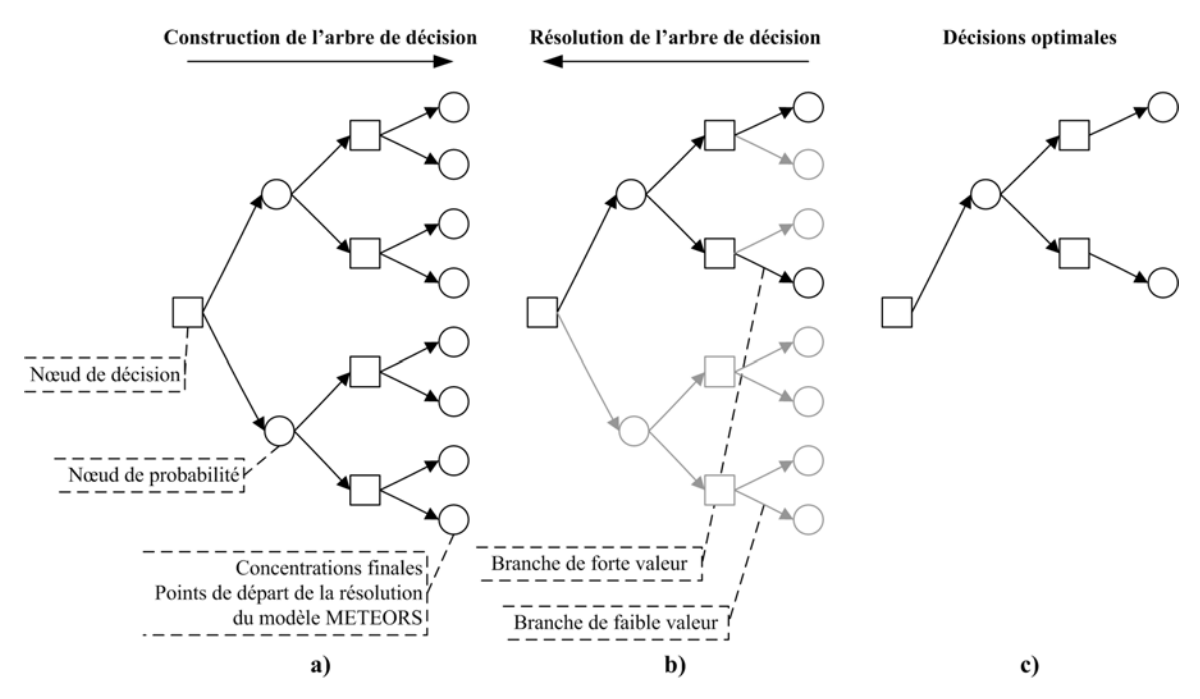


Figure 5-1 Exemple de résolution du modèle *METEORS*.

Il est à noter que la durée de la première partie de la résolution du modèle, soit la construction de l'arbre de décision, est fonction de la quantité de technologies considérées, de la durée maximale allouée pour l'atteinte de l'objectif de réhabilitation et de la quantité de situations (plages de contamination) définissant l'état du site. La vitesse du processeur mathématique du système sur lequel sera utilisé le logiciel aura également une influence sur la durée de cette première partie. Il est donc important que les utilisateurs du logiciel limitent le nombre de situations définissant l'état du site, en définissant des plages de contamination ayant une signification en matière de choix économique, technique ou réglementaire. Ainsi, comme le démontre l'exemple de la Figure 5-2, il ne serait pas nécessaire d'établir un changement de situation entre les concentrations de 700 et 3 500 mg diesel/kg s'il n'y a pas de changement d'utilisation du site entre ces deux concentrations.



Figure 5-2 Exemple des situations définissant l'état du site.

L'avantage que présente cet algorithme complet en deux volets est qu'il est possible d'identifier non seulement la stratégie optimale, mais également toute stratégie non optimale issue de contraintes particulières établies par l'utilisateur.

5.2. Établissement des bases de données économiques

5.2.1. Méthodologie

Les bases de données développées, dans la première phase du projet (livrée en 2001), étaient constituées de listes d'éléments faisant partie du dimensionnement typique des cinq technologies de réhabilitation choisies. Pour chaque élément, un coût représentatif du marché nord-américain était associé. Une fois les bases de données établies, un utilisateur pouvait, en connaissant les

besoins en équipements, matériaux et main-d'œuvre requis par une technologie, obtenir les coûts fixes et variables de traitement pour chacune des technologies.

Pour cette deuxième phase du projet, les bases de données déjà développées ont été revues et adaptées, dans la mesure du possible, aux marchés français et belges, autant en ce qui a trait au contenu qu'à la structure. Ainsi, pour certaines bases telles que celle des analyses chimiques par exemple, le contenu a été augmenté considérablement afin de couvrir une plus grande gamme d'éléments unitaires, en fonction de l'information obtenue des fournisseurs européens et des variations dans la description de chacun des éléments. Pour d'autres bases, le contenu a été simplifié afin de ne conserver que les éléments les plus significatifs, en ce qui concerne les coûts ou leur usage général, dans l'estimation économique globale. Il est à noter que si l'évaluation économique des éléments unitaires est plutôt facile à faire lorsqu'il s'agit d'éléments bien déterminés comme le matériel technique et les analyses chimiques, l'estimation des éléments dont la nature exacte varie selon les conditions de terrain, comme les coûts de forage et d'installation de piézomètres, reste approximative sans une connaissance appropriée des conditions d'application et devra faire l'objet d'une validation selon l'expérience de l'utilisateur et les ressources locales. Un tel ajustement des coûts de traitement est abordé à la section 5.2.3.3 (*Coûts particuliers des traitements*). Pour ce qui est de la structure, les modifications apportées sont présentées dans les sections suivantes.

Au cours de la recherche, il est apparu évident qu'il serait irréaliste d'établir un facteur de conversion des coûts nord-américains en coûts français ou belges en fonction de critères géographiques, tel qu'il avait été prévu initialement. En effet, étant donné le grand nombre d'éléments impliqués et surtout leur diversité, des variations uniformes des coûts selon l'emplacement géographique n'ont pu être observées de façon claire. Ainsi, pour réaliser l'étude, une recherche exhaustive de fournisseurs potentiels a été faite afin de couvrir la France et la Belgique. Ces fournisseurs ont été identifiés à la fois par divers contacts en Europe et par le biais d'Internet. Ensuite, les plus pertinents ont été contactés afin d'obtenir une gamme de prix pour chacun des éléments intégrés aux bases de données. Cette façon de procéder a permis à la fois d'adapter le contenu des bases de données aux éléments disponibles sur le marché et d'établir des coûts moyens plus réalistes.

5.2.2. Résultats obtenus

Les bases de données économiques ont été élaborées de façon à regrouper, à l'intérieur des bases de données dites *unitaires principales* (BdDUP), la structure et les éléments propres à chacune des technologies. Ces bases de données sont ensuite liées aux bases de données *unitaires communes* (BdDUC) regroupant les éléments partagés par plusieurs technologies (forages, pompes, réservoirs, système de tuyaux, excavation, etc.). Cette division des bases de données économiques est présentée à la Figure 5-3.

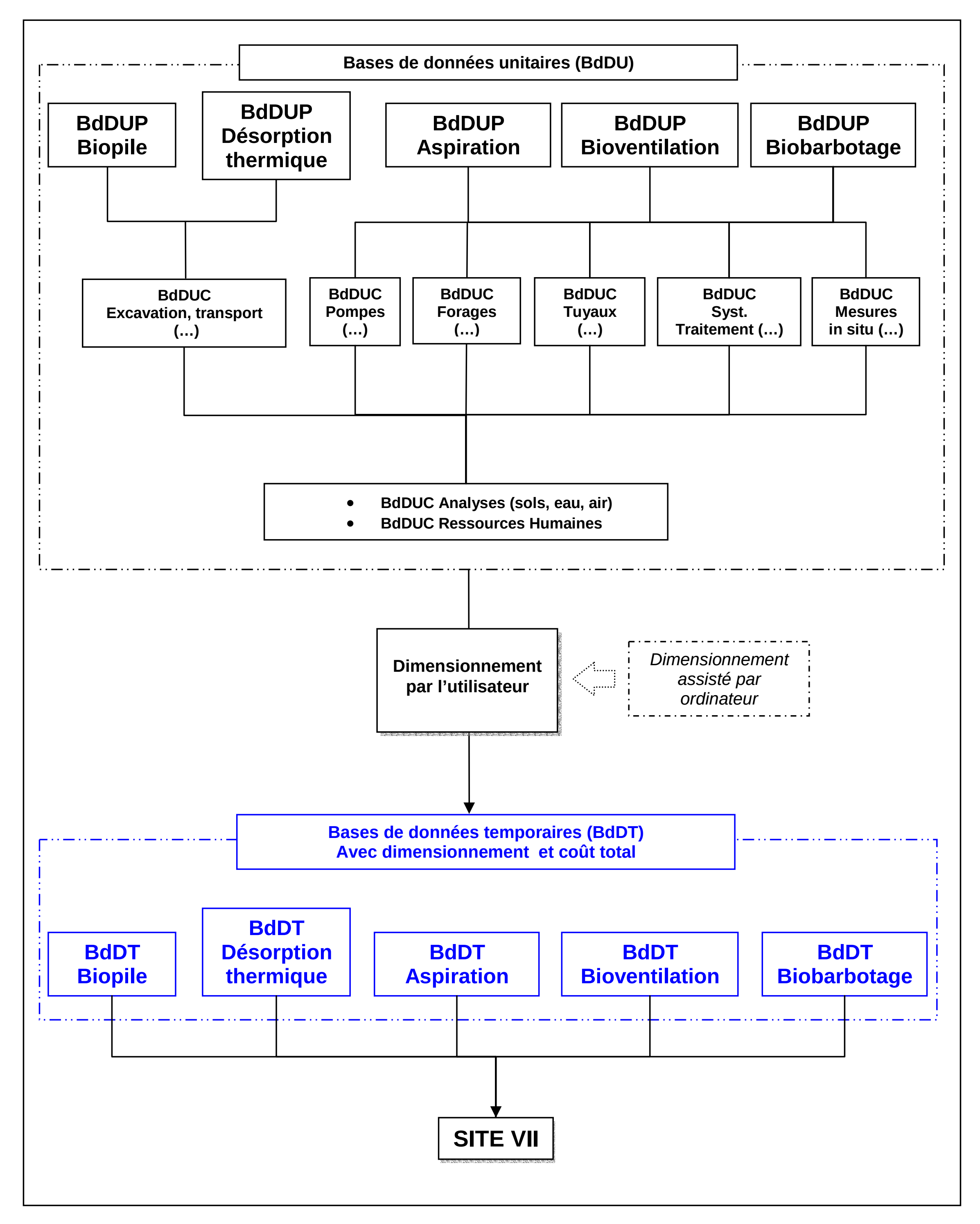


Figure 5-3 Schématisation de la structure organisationnelle des bases de données.

5.2.3. Définition et utilisation des bases de données

5.2.3.1. Bases de données unitaires (BdDU)

Les bases de données unitaires regroupent l'ensemble des bases de données développées et ce, avant dimensionnement de la technologie selon les caractéristique du site à l'étude. Ces bases de

données contiennent donc les coûts unitaires pour une grande diversité d'éléments pouvant faire partie de chacune des cinq technologies de réhabilitation, aussi bien durant la première période d'utilisation de la technologie (coûts fixes) qu'à chaque période d'utilisation (coûts variables). Ces bases contiennent une gamme de prix unitaires (minimum, maximum et moyen) pour chacun des éléments identifiés et constituent ainsi la source d'information principale pour l'évaluation économique. Les coûts sont généralement détaillés pour la France et la Belgique, mais dans plusieurs cas, l'information recueillie n'a pas permis d'évaluer les marchés séparément ou encore, d'observer de variation significative entre les pays. Dans ces cas, les mêmes coûts sont attribués pour les deux pays. Le logiciel SITE VII utilise la valeur moyenne pour chacun de ces éléments. Les coûts minimal et maximal sont donnés à titre informatif pour l'utilisateur.

Tel que présenté à la Figure 5-3, on retrouve ainsi les bases unitaires principales pour les éléments et la structure propres à chaque technologie, soit :

- Biopile;
- Désorption thermique;
- Aspiration;
- Bioventilation;
- Biobarbotage.

Puis, les bases de données pour les éléments partagés entre les technologies:

- Excavation, transport des sols;
- Pompes et soufflantes;
- Forages, piézomètres, prélèvements;
- Tuyaux, raccords, vannes;
- Systèmes de traitement et autres;
- Systèmes de suivi, instruments de mesures;
- Analyses (sols, eau, air);
- Ressources humaines (salaires ou honoraires).

5.2.3.2. Bases de données temporaires (BdDT) utilisées dans le logiciel

Les bases de données temporaires sont créées lors de l'évaluation économique des technologies, c'est-à-dire lors du choix des éléments requis et de leurs quantités. Une fois ces bases de données instaurées, elles sont utilisées directement par le logiciel SITE VII pour la suite de l'analyse technico-économique. Cette utilisation de bases de données temporaires présente l'avantage d'alléger la quantité d'information que le logiciel doit maintenir en mémoire durant les simulations.

5.2.3.3. Coûts particuliers des traitements

Une option permettant à l'utilisateur de contourner l'opération de quantification des éléments unitaires des technologies a été pensée. Elle permet à un utilisateur qui connaît déjà les coûts de traitement des différentes technologies ou qui veut utiliser un estimé provenant d'une source externe au logiciel, de saisir directement ces valeurs. Dans ce cas, c'est à l'utilisateur que revient la responsabilité de considérer la qualité de ces valeurs lors de l'utilisation des résultats de la simulation. Puisque le logiciel évalue le choix optimal de réhabilitation à chaque période, il requiert l'utilisation de données économiques fixes et variables, c'est-à-dire de coûts associés à l'implantation de la technologie et son arrêt et de coûts associés à son utilisation annuelle. L'utilisateur devra donc donner ces deux coûts lorsqu'il désirera utiliser cette option. Finalement, il est à noter que pour des raisons de variations dans les prix locaux dues probablement à la compétition (notamment dans le prix de la main-d'œuvre locale), il est difficile de comparer le coût d'une technologie établi à l'aide des bases de données économiques et un coût fixé à l'aide

d'une soumission. Ainsi, l'utilisation de cette option de coûts particuliers des traitements doit être faite pour toutes les technologies. Par exemple, il ne serait pas possible de fixer les coûts fixes et variables de l'aspiration mais d'utiliser les coûts unitaires des bases de données pour les autres technologies.

5.3. Établissement de l'état du site

L'état du site a été défini par Bage et al. (2002) comme étant une distribution des probabilités d'occurrence des différentes situations (plages de contamination) possibles sur le site. Ce vecteur de données a la particularité de permettre l'utilisation d'une seule variable (q) dans le modèle *METEORS* pour représenter l'incertitude quant au niveau réel de contamination. Ainsi, il est nécessaire, pour l'application du modèle et l'établissement de la stratégie de réhabilitation, d'attribuer une probabilité d'occurrence à chacune des situations définies par l'utilisateur. Le module d'évaluation de ces probabilités d'occurrence se base sur l'utilisation de simulations géostatistiques afin d'estimer des concentrations sur l'ensemble du site (sur un maillage régulier couvrant le site) à partir des données de concentrations connues (saisies par l'utilisateur). De telles simulations géostatistiques utilisent des relations indiquant le degré d'influence qu'a un point de concentration sur un autre point selon la distance qui les sépare. Pour représenter cette influence, la notion de variogramme est utilisée. Pour une distance donnée, le variogramme correspond à la moitié de la moyenne des différences au carré entre tous les points sur le site séparés par cette distance (Isaaks and Srivastava 1989). Ainsi, plus la distance entre les points augmente, moins il y a d'influence entre ceux-ci et plus grande est la différence entre les valeurs. Ceci se solde par une augmentation de la valeur du variogramme avec l'augmentation de la distance. Au-delà d'une certaine distance, la valeur du variogramme atteint un plateau, signifiant que les points n'ont plus d'influence les uns sur les autres lorsqu'ils sont espacés d'une telle distance et plus.

La connaissance des paramètres d'un tel variogramme est essentielle pour l'établissement des probabilités d'occurrence des différentes situations du site. Le module chargé de cet établissement nécessite la connaissance de trois paramètres qui définissent un variogramme (voir également la Figure 5-4):

1) *Nugget* : appelé également l'effet de pépite, ce paramètre représente la variation naturelle entre des points extrêmement rapprochés. Pour une distance nulle, la valeur du variogramme est zéro; mais pour une légère distance entre deux points, il est naturel de noter une différence de valeur. Le nugget est ce saut dans la valeur du variogramme pour une très petite distance. Graphiquement, il s'agit de l'ordonnée à l'origine du variogramme.

2) *Sill* : c'est la valeur du plateau atteint lorsque les points n'ont plus d'effet les uns sur les autres. Le *Sill* est considéré dans le logiciel *GeoEAS* (V1.2.1) (logiciel recommandé dans SITE VII pour paramétrer le variogramme) non pas comme étant la valeur du plateau, mais la différence entre la valeur du plateau (valeur maximale) et le *Nugget*.

3) *Range* : c'est la distance entre les points à partir de laquelle ils n'ont plus d'effet les uns sur les autres. C'est la distance à laquelle il y a apparition du plateau.

Selon la forme des données de concentration utilisées dans SITE VII, la valeur du plateau (*Sill*) doit avoisiner l'unité tandis que la distance à laquelle les effets ne se font plus sentir (*Range*) doit être d'un ordre de grandeur respectant les limites maximales du site. Ces deux contraintes guident l'utilisateur dans l'établissement des paramètres du variogramme.

Différents modèles de variogramme existent, les plus connus étant le sphérique, l'exponentiel et le gaussien. Le variogramme sphérique représente bien une contamination dans un sol ou une eau

souterraine. Il est caractérisé par une relation linéaire pour de faibles distances. De plus, la tangente à l'origine atteint le plateau (*sill*) pour une distance approximative au deux tiers (2/3) du *range*.

Il existe différents logiciels qui permettent d'aider à établir les valeurs de ces trois paramètres pour modéliser le variogramme de leurs données. Dans cette première version du logiciel SITE VII, il a été décidé de ne pas mettre l'accent sur le développement d'un module permettant de modéliser le variogramme, mais plutôt de faire appel à ces logiciels. En effet, le développement d'un tel module aurait demandé un investissement en temps qui aurait dû être fait au détriment du développement de modules spécifiques au logiciel SITE VII. Parmi les logiciels qui existent, la Chaire a arrêté son choix pour ses propres travaux de recherche sur le logiciel *Geo-EAS* (*Geostatistical Environmental Assessment Software*) développé par le US EPA. Ce logiciel fonctionne dans un environnement DOS, il permet à partir d'un fichier de données en format texte (txt), ayant une mise en page adéquate, d'établir les paramètres du variogramme sphérique nécessaire dans SITE VII, soit le *nugget*, la différence entre le *sill* et le *nugget*, et le *range*. Ce logiciel présente l'avantage d'être relativement simple d'utilisation tout en étant un gratuiciel (distribution libre et gratuite), pouvant donc être fourni avec le logiciel SITE VII. La Figure 5-4 présente un exemple de variogramme sphérique modélisé à l'aide du logiciel *Geo-EAS (V1.2.1)*.

Ainsi, au début de la simulation de la réhabilitation de la zone vadose ou de la zone saturée (eau souterraine), le logiciel SITE VII prépare un fichier de données nécessaire au logiciel *Geo-EAS*, suspend la simulation, invite l'utilisateur à modéliser le variogramme à l'aide de ce petit logiciel et du fichier de données requis et, une fois le variogramme paramétré, reprend la simulation. Conscient que certains utilisateurs peuvent posséder d'autres logiciels pour modéliser un variogramme (le logiciel *Surfer*® développé par Golden Software et requis par d'autres logiciels de la série *SITE* permet notamment de modéliser des variogrammes), il leur est possible d'utiliser leur logiciel en modifiant le fichier de données tel que requis par le logiciel retenu.

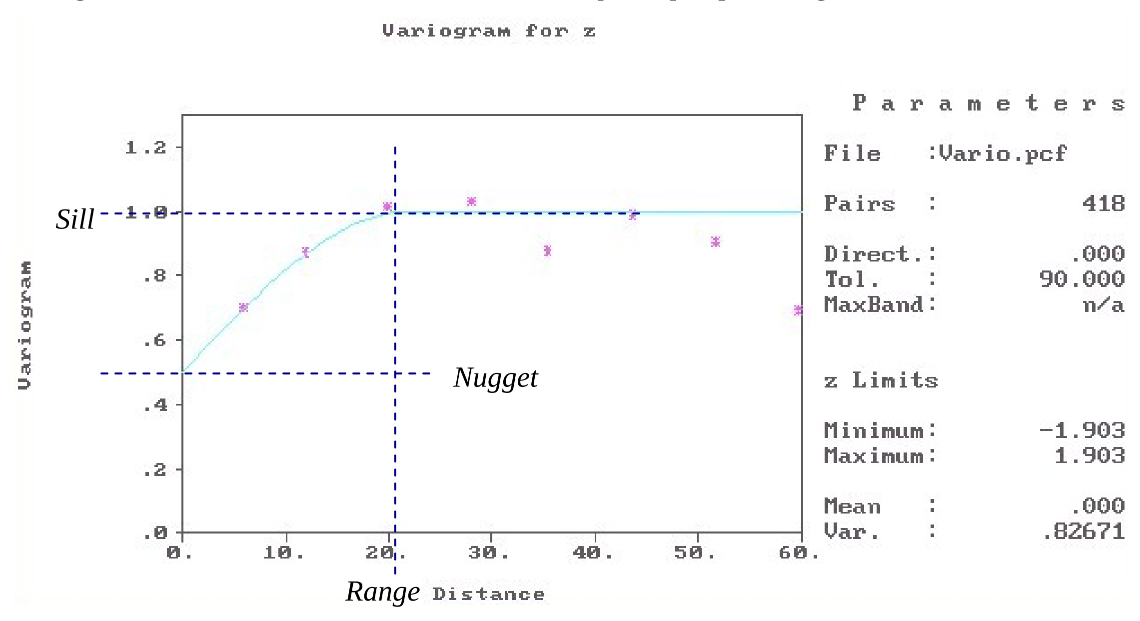


Figure 5-4 Exemple de variogramme issu du logiciel *Geo-EAS*

Dans un premier temps, le module géostatistique du logiciel SITE VII génère à partir des concentrations connues sur le site et des paramètres du variogramme un ensemble de concentrations couvrant toute la surface du site suivant un maillage régulier (10 mètres par 10 mètres). Si une moyenne arithmétique des concentrations connues n'était pas possible

initialement en raison de l'hétérogénéité de l'échantillonnage, cette barrière n'existe plus en présence de cet ensemble de concentrations couvrant tout le site. Une concentration moyenne est donc calculée pour toutes ces concentrations. Afin de minimiser tout effet aléatoire dans la génération de ces concentrations, l'exercice est répété jusqu'à l'obtention de 750 ensembles de concentrations, et donc de 750 concentrations moyennes. Dans un second temps, le module géostatistique établit les probabilités d'occurrence de chacune des situations définies par l'utilisateur en classant les 750 concentrations moyennes dans leurs situations respectives. La proportion de concentrations moyennes dans chacune de ces situations par rapport au nombre total de concentrations (750) donne la probabilité d'occurrence de cette situation.

Ce module géostatistique est exécuté à chaque fois qu'une technologie modifie le niveau de contamination sur le site.

5.4. Efficacité des technologies

Avant d'aborder les efficacités à proprement parler pour les différentes technologies considérées, la première partie de cette section présente la logique que suit le logiciel pour évaluer les différentes technologies. Par la suite, une description de la méthodologie utilisée pour établir l'efficacité des technologies est exposée. Finalement, les efficacités pour chacune des cinq technologies sont présentées.

5.4.1. Logique d'évaluation des technologies

Puisque les cinq technologies considérées dans le logiciel présentent chacune des particularités quant à la forme du contaminant (adsorbé sur les particules de sol, dissous dans l'eau souterraine ou en phase libre) et à l'intervention requise pour traiter le sol dans le cas d'une contamination de la zone vadose (technologies *in situ* ou *ex situ*), il a été nécessaire d'établir une logique d'évaluation des différentes technologies. Tel que stipulé dans les hypothèses générales, le traitement de la zone saturée (eau souterraine) n'est entrepris au besoin que s'il n'y a pas de contamination de la zone vadose ou si elle a déjà fait l'objet d'un traitement. Cette impossibilité de traiter l'eau souterraine tant et aussi longtemps qu'il y a une contamination du sol vient du fait qu'un sol contaminé est considéré comme une source potentielle de contamination pour les eaux souterraines en raison de la migration possible du contaminant de la zone vadose vers la zone saturée ou du battement (variation de la hauteur (profondeur) de la nappe phréatique). Une seconde restriction vient influencer la logique du traitement du site : la présence d'une phase libre de contaminant. Qu'il s'agisse du traitement de la zone vadose ou saturée, s'il y a présence d'une phase libre, un traitement par pompage de ce contaminant est impératif avant tout autre traitement de la zone contaminée (U.S. Environmental Protection Agency 1995). Selon les technologies considérées dans ce logiciel, la récupération de la phase libre est réalisée par aspiration. Finalement, une dernière restriction est considérée dans cette logique lorsqu'il est question de traitement de la zone vadose : la présence d'infrastructures sur le site empêche l'excavation des sols contaminés. Dans un tel cas, seules les technologies *in situ* sont possibles, c'est-à-dire uniquement la bioventilation dans le cadre de ce projet. La Figure 5-5 présente cette logique d'évaluation des technologies de réhabilitation des sites. Les détails relatifs aux efficacités, aux limitations spécifiques de l'applicabilité des technologies et aux taux d'enlèvement annuels sont discutés dans la section 5.4.3 (*Efficacités considérées dans le logiciel*).

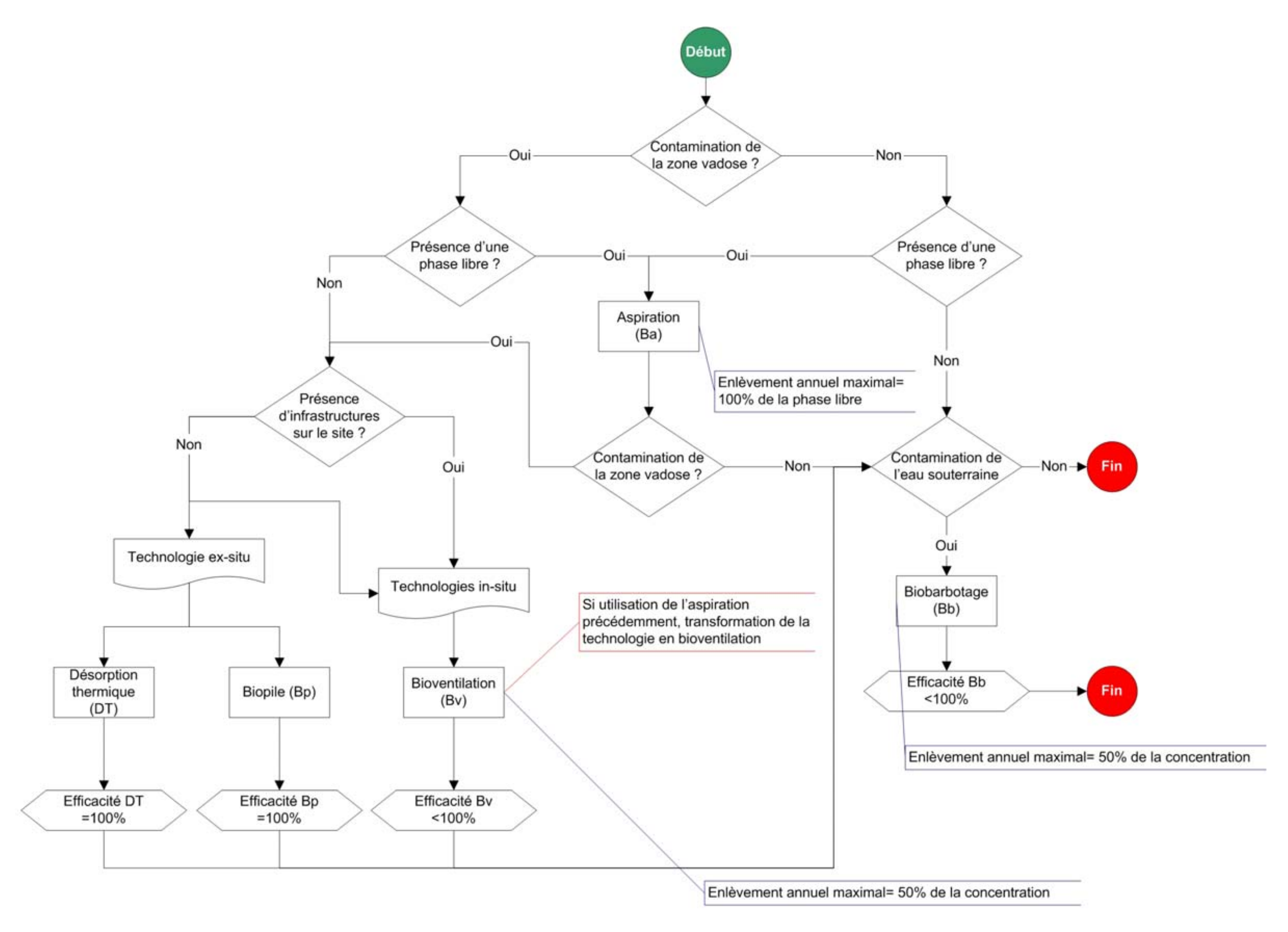


Figure 5-5 Logique d'évaluation des technologies.

5.4.2. Méthodologie pour établir les efficacités

Avant de présenter les différentes équations permettant d'établir les efficacités des technologies considérées dans le logiciel SITE VII, cette section présente la méthodologie qui a été utilisée pour réaliser cette tâche. Il est important de rappeler que l'efficacité des technologies a été évaluée en considérant le traitement d'une contamination au diesel.

L'efficacité d'une technologie peut être influencée par divers paramètres associés au site ou au contaminant. Pour chacun de ces paramètres, il existe une plage de valeurs pour laquelle l'efficacité de la technologie est optimale. Si la valeur réelle d'un paramètre est en dehors de sa plage d'optimalité, l'efficacité de la technologie est réduite de façon plus ou moins importante selon l'écart entre cette valeur et la plage optimale et l'influence qu'a le paramètre sur l'efficacité de la technologie. Une liste des paramètres influençant, avec plus ou moins d'importance, l'efficacité de chaque technologie a été établie. Pour chacun de ces paramètres, leurs différentes valeurs possibles ont été identifiées.

Suite à cet exercice, il a fallu différencier, pour chaque technologie, les paramètres selon leur importance vis-à-vis l'efficacité de cette technologie. Pour ce faire, les paramètres ont été pondérés entre eux à l'aide de la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (Saaty 1980; Saaty 1981; Saaty 1994). Cette méthode consiste à comparer l'ensemble des paramètres deux par deux. Cette méthode a l'avantage de permettre d'évaluer la cohérence des évaluateurs et ainsi, d'éventuellement reprendre l'exercice de pondération en cas d'incohérence majeure. De plus, cette méthode est relativement simple d'application car la réflexion qu'elle demande aux personnes sondées est similaire à celle qu'elles auraient probablement faite inconsciemment si elles avaient eu à pondérer ces paramètres sans méthode particulière. Un critère maximal de 10 % d'incohérence est communément utilisé pour juger de la pondération. Afin de réduire le nombre de comparaisons à réaliser et ainsi réduire les risques d'incohérence, les paramètres de chaque technologie ont été divisés en deux groupes, à savoir ceux associés au site et ceux associés au contaminant. Les paramètres ont été comparés deux à deux à l'intérieur de chaque groupe, et par la suite les deux groupes ont eux-mêmes ont été comparés l'un par rapport à l'autre. En affectant au poids de chaque paramètre le poids de son groupe, il est ainsi possible de recréer un ensemble complet de paramètres pondérés les uns par rapport aux autres. Les comparaisons des paramètres sont données à l'annexe A pour l'aspiration, le biobarbotage et la bioventilation.

5.4.3. Efficacités considérées dans le logiciel

Il est à noter que dans l'établissement des efficacités des technologies, certains paramètres spécifiques au type du contaminant sont pris en considération. Dans de tels cas, l'influence de ces paramètres sur l'efficacité des technologies a été évaluée dans une perspective d'une contamination au diesel.

5.4.3.1. <u>Aspiration</u>

L'hypothèse a été faite que cette technologie est utilisée si et seulement s'il y a présence d'une phase libre et qu'il n'y a aucune diminution de la concentration en contaminant dans la zone vadose ou saturée durant la récupération de la phase libre (voir la section 4.2.2). La totalité de la phase libre est récupérée en une année de traitement. De plus, une fois la phase libre récupérée, s'il y a contamination de la zone vadose et qu'un traitement *in situ* est retenu pour réduire cette contamination, l'aspiration est transformée en bioventilation. Suivant ces hypothèses, il n'y avait pas lieu d'identifier les paramètres influençant l'efficacité de l'aspiration. Or, cet exercice a tout de même été réalisé car cette pondération est également utilisée dans l'évaluation de la qualité des données (voir la section 5.5). Tout comme pour le calcul de l'efficacité, la qualité de la valeur

d'un paramètre n'aura pas le même impact sur la qualité globale associée à la technologie selon que ce paramètre a une influence importante ou faible sur l'efficacité de la technologie. Ainsi, la qualité moyenne des données associées à cette technologie est établie en utilisant les poids des paramètres influençant l'efficacité de l'aspiration (voir le Tableau 5-1).

Tableau 5-1 Paramètres et poids pour l'évaluation de la qualité des données associées à l'aspiration

Paramètres	**Poids (%)**
Perméabilité intrinsèque de la zone vadose (PI)	31,7
Stratigraphie du sol (SS)	33,9
pH du sol (pH)	2,9
Teneur en humidité du sol (TH)	6,8
Température du sol (TS)	2,8
Profondeur de la nappe phréatique (PNp)	11,9
Volatilité du contaminant (Vo)	9,0
Concentration en contaminant (CC)	1,0

Parmi toutes les pondérations réalisées dans le cadre de ce projet, une seule série de comparaison a dépassé ce critère avec une valeur de 10,79 % (Tableau 5-2). Compte tenu de ce faible dépassement (+0,79 %), l'exercice de pondération n'a pas été repris.

Tableau 5-2 Tableau d'incohérence issu de la comparaison des paramètres influençant l'aspiration

Paramètres associés au site	10,79 %
Paramètres associés au contaminant	0 %
Comparaison des deux groupes	0 %

5.4.3.2. Biobarbotage

Le biobarbotage est la seule technologie dans le logiciel qui est utilisée lors d'une contamination de la zone saturée (eau souterraine). En raison de son caractère *in situ*, l'ajustement des paramètres influençant l'efficacité de cette technologie peut être relativement difficile. C'est pour cette raison qu'il a été nécessaire de développer une équation permettant d'évaluer l'efficacité du biobarbotage. Le Tableau 5-3 présente les paramètres influençant cette technologie, leurs poids (établis selon la méthodologie de pondération), les valeurs possibles pour ces paramètres et leurs notes. Les incohérences de cette pondération sont données au Tableau 5-4.

Tableau 5-3 Paramètres, poids et notes pour l'évaluation de l'efficacité de le biobarbotage

Paramètres	**Poids (%)**	**Valeurs**	**Note**
Conductivité hydraulique (zone saturée) (PIsat)	24,75	> 1E-4 m/s	10
		1E-7 à 1E-4 m/s	8
		1E-9 à 1E-7 m/s	3
		< 1E-9 m/s	0

Paramètres	Poids (%)	Valeurs	Note
Stratigraphie du sol (SS)	24,75	Composition uniforme de sable ou gravier	10
		Composition uniforme de till sableux ou tourbe	9
		Composition uniforme de silt	7
		Remblai perméable	6
		Till sableux contenant des lentilles imperméables (argile)	5
		Remblai imperméable	4
		Argile très fracturée	3
		Roc métamorphique ou igné fracturé	2
		Argile peu fracturée	1
		Roc sain	1
pH de l'eau (pHE)	7,05	6,8 à 7,2	10
		6 à 6,8 ou 7,2 à 8	9
		5 à 6 ou 8 à 9	5
		1 à 5 ou 9 à 14	0
Température de l'eau (TE)	2,56	20 à 40°C	10
		10 à 20 °C	7,5
		5 à 10 ou 40 à 45°C	2,5
		< 5°C ou > 45°C	0
Profondeur de la nappe phréatique (PNp)	2,71	> 3,00 mètres	10
		2,00 à 3,00 mètres	7
		1,00 à 2,00 mètres	3
		< 1,00 mètre	0
Concentration en fer dissous dans l'eau souterraine (FD)	25,68	< 10 mg/L	10
		10 à 20 mg/L	5
		> 20 mg/L	0
Solubilité des gaz (constante de Henry) (So)	6,25	SITE VII (V1.0.0) est conçu pour le traitement des hydrocarbures pétroliers similaires au diesel. Dans ces circonstances, la solubilité du contaminant n'affecte pas à la baisse l'efficacité du biobarbotage. Le paramètre a toutefois été pondéré et programmé pour éventuellement considérer d'autres contaminants. Une qualité faible d'information est associée à ce paramètre.	10
Concentration en contaminant (CC)	6,25	< 5 000 µg/L	10
		5 000 à 10 000 µg/L	9
		10 000 à 25 000 µg/L	7
		25 000 à 50 000 µg/L	5
		>50 000 µg/L	0
Facteurs de contrôle			
Concentration et toxicité du contaminant (pour les métaux lourds) (ContM)	X	< 100 mg/kg	1
		100 à 500 mg/kg	1
		500 à 1000 mg/kg	1
		1000 à 2500 mg/kg	1
		> 2500 mg/kg	0
Présence d'une microflore adaptée au diesel (ContMF)	X	Oui	1
		Non	0
Aquifère contaminé confiné (ContCf)	X	Oui	0
		Non	1

Paramètres	Poids (%)	Valeurs	Note
Phase libre (ContPL)	X	Oui	0
		Non	1

Tableau 5-4 Tableau d'incohérence issu de la comparaison des paramètres influençant le biobarbotage

Paramètres associés au site	7,20 %
Paramètres associés au contaminant	0 %
Comparaison des deux groupes	0 %

Suite à cette pondération pour le biobarbotage, l'efficacité est évaluée dans le logiciel à l'aide de l'Équation 5-1. Le détail entourant le paramètre « *Cible* » est donnée à la section 5.4.4 (Taux annuel d'enlèvement).

$$\text{Eff}_{\text{Biobarbotage}} = ContM \cdot ContCf \cdot ContMF \cdot ContPL \cdot Cible \cdots$$

$$\cdots \frac{24{,}75 \cdot PISat + 24{,}75 \cdot SS + 7{,}05 \cdot pHE + 2{,}56 \cdot TE + 2{,}71 \cdot PNp + 25{,}68 \cdot FD + 6{,}25 \cdot So + 6{,}25 \cdot CC}{1000}$$

Équation 5-1 Efficacité du biobarbotage.

Le caractère *in situ* du biobarbotage permet de qualifier cette technologie de réversible. Or, comme il s'agit de la seule technologie dans le logiciel SITE VII pour le traitement de la zone saturée, aucune autre technologie de remplacement n'est possible pour la poursuite de traitement de l'eau souterraine après une période d'utilisation du biobarbotage. Dans le cas d'une contamination de la zone saturée, le logiciel SITE VII ne sert donc pas d'outil d'évaluation de la meilleure stratégie de réhabilitation, mais plutôt d'un outil permettant d'évaluer les espérances quant à la durée et aux coûts de réhabilitation. D'un point de vue décisionnel, le logiciel permet également de juger s'il est techniquement et économiquement préférable de traiter la zone saturée par biobarbotage ou de ne pas la traiter.

5.4.3.3. Biopile

Les paramètres influençant les technologies requérant l'excavation des sols contaminés (technologies dites *ex situ*) présentent la particularité d'être ajustables. C'est-à-dire qu'il est possible de modifier physiquement les valeurs des paramètres qui influencent leurs efficacités pour en optimiser le traitement et ce, relativement simplement. Par exemple, il est possible pour le traitement en biopile d'ajuster la teneur en humidité ainsi que le pH et la porosité générale du sol par l'ajout de chaux et de copeaux de bois (von Fahnestock *et al.* 1998; Jorgensen *et al.* 2000). En raison de cette possibilité d'ajuster les paramètres influençant le traitement, l'efficacité du traitement en biopile est fixée à 100 %. Cette efficacité est toutefois conditionnelle au respect des facteurs de contrôle de cette technologie présentés au Tableau 5-5. Les poids associés à ces paramètres sont utilisés uniquement pour le calcul de la qualité des données. Ces poids ont été établis non pas en utilisant la méthode *AHP*, mais en accordant une importance équivalente à chaque paramètre puisqu'il s'agit de facteurs de contrôle. Le non respect d'un seul de ces facteurs empêche toute utilisation de cette technologie.

Le caractère *ex situ* du traitement en biopile implique que cette technologie est irréversible. C'est-à-dire que suite à l'application partielle de cette technologie (une année par exemple), l'ensemble des technologies possibles à l'année suivante pour poursuivre le traitement de la zone vadose est réduit uniquement aux technologies nécessitant l'excavation du sol, soit encore le

traitement en biopile ou un changement pour la désorption thermique dans le cas des technologies considérées dans ce logiciel. L'irréversibilité d'une technologie ne s'applique que pour le milieu contaminé ciblé par la technologie. Ainsi, l'effet d'irréversibilité d'une technologie associée à la zone vadose n'a pas d'influence sur les choix technologiques pour la zone saturée.

Tableau 5-5 Facteurs de contrôle limitant l'applicabilité d'un traitement par biopile

Paramètres associés au site	Poids (%)	Valeur	Applicabilité de la technologie
Présence d'infrastructures limitant l'excavation	20,0	Oui	Non
		Non	Oui
Concentration et toxicité du contaminant (pour les métaux lourds) (ContM)	20,0	< 2 500 mg/kg	Oui
		> 2 500 mg/kg	Non
Présence d'une microflore adaptée au diesel (ContMF)	20,0	Oui	Oui
		Non	Non
Phase libre (ContPL)	20,0	Oui	Non
		Non	Oui
Concentration en contaminant (CC)	20,0	< 50 000 mg/kg	Oui
		> 50 000 mg/kg	Non

5.4.3.4. Bioventilation

La bioventilation permet de diminuer la contamination dans la zone vadose sans excaver le sol. Tout comme pour les autres technologies ne requérant pas d'excavation du sol, l'ajustement des paramètres influençant l'efficacité du traitement peut être relativement complexe. Ainsi, sans de tels ajustements, l'efficacité de la technologie est soumise aux valeurs des paramètres qui l'influencent. Ces paramètres, leurs poids, les valeurs qu'ils peuvent prendre et les notes qui y sont associées sont présentés au Tableau 5-6. La cohérence de ces pondérations est donnée au Tableau 5-7.

Tableau 5-6 Paramètres, poids et notes pour l'évaluation de l'efficacité de la bioventilation

Paramètres	Poids (%)	Valeurs	Note
Perméabilité intrinsèque (PI)	10,5	> 1 darcy (> 1E-8 cm^2)	10
		0,1 à 1 darcy (1E-9 à 1E-8 cm^2)	8
		0,01 à 0,1 darcy (1E-10 à 1E-9 cm^2)	5
		< 0,01 darcy (< 1E-10 cm^2)	0
Stratigraphie du sol (SS)	4,55	Composition uniforme de sable ou gravier	10
		Composition uniforme de till sableux ou tourbe	9
		Composition uniforme de silt	7
		Remblai perméable	6
		Till sableux contenant des lentilles imperméables (argile)	5
		Remblai imperméable	4
		Argile très fracturée	3
		Roc métamorphique ou igné fracturé	2
		Argile peu fracturée	1
		Roc sain	1
pH du sol (pH)	10,5	6,8 à 7,2	10
		6 à 6,8 ou 7,2 à 8	9
		5 à 6 ou 8 à 9	5
		1 à 5 ou 9 à 14	0
Teneur en humidité du sol	2,1	5 à 15 % massique	10
		15 à 25 % massique	7

(TH)		2 à 5 % massique	5
		< 2 % ou > 25 % massique	0
Température du sol (TS)	1,25	20 à 40°C	10
		10 à 20°C	7,5
		5 à 10°C	2,5
		< 5°C ou > 40°C	0
Profondeur de la nappe phréatique (PNp)	21,1	> 3,00 mètres	10
		2,00 à 3,00 mètres	7
		1,00 à 2,00 mètres	3
		< 1,00 mètre	0
Volatilité (Vo) (exprimée en tension de vapeur)	25,0	SITE VII (V1.0.0) est conçu pour le traitement des hydrocarbures pétroliers similaires au diesel. Dans ces circonstances, la volatilité du contaminant n'affecte pas à la baisse l'efficacité de la bioventilation. Le paramètre a toutefois été pondéré et programmé pour éventuellement considérer d'autres contaminants. Une qualité faible d'information est associée à ce paramètre.	10
Concentration en contaminant (CC)	25,0	< 1 000 mg/kg	10
		1 000 à 5 000 mg/kg	9
		5 000 à 10 000 mg/kg	7
		10 000 à 25 000 mg/kg	5
		>25 000 mg/kg	0
Facteurs de contrôle (Cont)			
Concentration et toxicité du contaminant (pour les métaux lourds) (ContM)	X	< 100 mg/kg	1
		100 à 500 mg/kg	1
		500 à 1000 mg/kg	1
		1000 à 2500 mg/kg	1
		> 2500 mg/kg	0
Présence d'une microflore adaptée au diesel (ContMF)	X	Oui	1
		Non	0
Phase libre (ContPL)	X	Oui	0
		Non	1

Tableau 5-7 Tableau d'incohérence issu de la comparaison des paramètres influençant la bioventilation

Paramètres associés au site	4,50 %
Paramètres associés au contaminant	0 %
Comparaison des deux groupes	0 %

L'efficacité de la bioventilation est évaluée dans le logiciel à l'aide de l'Équation 5-2. Le détail entourant le paramètre « *Cible* » est donnée à la section 5.4.4 (Taux annuel d'enlèvement).

$$\mathrm{Eff}_{\mathrm{Bioventilation}} = ContM \cdot ContMF \cdot ContPL \cdot Cible \cdots$$
$$\cdots \frac{10{,}5 \cdot PI + 4{,}55 \cdot SS + 10{,}5 \cdot pH + 2{,}1 \cdot TH + 1{,}25 \cdot TS + 21{,}1 \cdot PNp + 25{,}0 \cdot Vo + 25{,}0 \cdot CC}{1000}$$

Équation 5-2 Efficacité de la bioventilation.

Tout comme pour les autres technologies *in situ*, la bioventilation est considérée comme réversible. Pour chaque période suivant son utilisation, si les objectifs de réhabilitation et le critère temporel ne sont pas atteints, il est possible de conserver cette technologie ou de changer

en ayant recours à toutes les technologies initialement applicables. Ainsi, il est possible d'utiliser une des deux technologies *ex situ* (biopile ou désorption thermique) (si applicable) ou de poursuivre avec la bioventilation suite à une période d'utilisation de cette dernière. L'encadré 5-1 présente un exemple de calcul de l'efficacité maximale de la bioventilation pour un site donné selon les paramètres influençant cette technologie.

Encadré 5-1 Exemple de calculs de l'efficacité maximale

Soit les paramètres suivants et leurs valeurs influençant la réhabilitation de la zone vadose par bioventilation.

- Perméabilité intrinsèque (PI): $2{,}17 \times 10^{-8}$ cm^2
- Stratigraphie du sol (SS): Remblai perméable
- pH du sol (pH): 7
- Teneur en humidité (TH): 10% masique
- Température du sol (TS): $12^{o}C$
- Profondeur de la nappe phréatique (PNp): 1,5 mètres
- Volatilité (Vo): < 1 mm Hg (contamination au diesel)
- Concentration en contaminant (CC): 6145 mg/kg
- Concentration et toxicité du contaminant (ContM): 150 mg/kg
- Présence d'une microflore adaptée au diesel (ContMF): Oui
- Présence d'une phase libre (ContPL): Non

Selon les notes associées aux valeurs de ces paramètres (voir le Tableau 5-6), les notes suivantes sont attribuées aux paramètres de ce site:

- Perméabilité intrinsèque (PI): 10
- Stratigraphie du sol (SS): 6
- pH du sol (pH): 10
- Teneur en humidité (TH): 10
- Température du sol (TS): 7,5
- Profondeur de la nappe phréatique (PNp): 3
- Volatilité (Vo): 10 (Note attribuée systématiquement dans cette version du logiciel)
- Concentration en contaminant (CC): 7
- Concentration et toxicité du contaminant (ContM): 1
- Présence d'une microflore adaptée au diesel (ContMF): 1
- Présence d'une phase libre (ContPL): 1

En utilisant l'Équation 5-2, l'efficacité de la bioventilation pour ce site est de:

$$\mathrm{Eff}_{\mathrm{Bioventilation}} = ContM \cdot ContMF \cdot ContPL \cdot Cible \cdots$$
$$\cdots \frac{10{,}5 \cdot PI + 4{,}55 \cdot SS + 10{,}5 \cdot pH + 2{,}1 \cdot TH + 1{,}25 \cdot TS + 21{,}1 \cdot PNp + 25{,}0 \cdot Vo + 25{,}0 \cdot CC}{1000}$$

$$\mathrm{Eff}_{\mathrm{Bioventilation}} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot Cible \cdots$$
$$\cdots \frac{10{,}5 \cdot 10 + 4{,}55 \cdot 6 + 10{,}5 \cdot 10 + 2{,}1 \cdot 10 + 1{,}25 \cdot 7{,}5 + 21{,}1 \cdot 3 + 25{,}0 \cdot 10 + 25{,}0 \cdot 7}{1000}$$

$$Eff_{\mathrm{Bioventilation}} = Cible \cdot 0{,}756$$

Ainsi, l'efficacité maximale (Cible=1) de la bioventilation pour ce site est de 75,6%. Cette efficacité sera réduite selon la plage de concentration à atteindre (voir l'encadré 5-2).

5.4.3.5. Désorption thermique

Tout comme pour le traitement en biopile, la possibilité d'ajuster les paramètres influençant la désorption thermique permet de fixer l'efficacité de cette technologie à 100 %. Il existe tout de même quelques facteurs de contrôle (Tableau 5-8) limitant l'utilisation de cette technologie. Le non respect d'un seul de ces facteurs empêche l'applicabilité de la désorption thermique. Les poids associés à ces paramètres sont uniquement utilisés dans le calcul de la qualité des données. Ces poids ont été établis non pas en utilisant la méthode *AHP*, mais en accordant une importance équivalente à chaque paramètre puisqu'il s'agit de facteurs de contrôle.

Le caractère *ex situ* de la désorption thermique implique que cette technologie est irréversible. Une fois que ce traitement est engagé, il ne peut être changé, pour poursuivre dans le futur le traitement de la zone vadose, que par une autre technologie requérant l'excavation des sols. De plus, il est considéré qu'une fois la désorption thermique débutée, il n'est plus possible de changer de technologie. Cette technologie représente donc un cas d'irréversibilité totale.

Tableau 5-8 Facteurs de contrôle limitant l'applicabilité de la désorption thermique

Paramètres associés au site	**Poids (%)**	**Valeur**	**Applicabilité de la technologie**
Présence d'infrastructures limitant l'excavation	25,0	Oui	Non
		Non	Oui
Nature du sol (SS)	25,0	Présence de cailloux ou gravier	Oui
		Sable ou gravier	Oui
		Silt	Oui
		Silt argileux	Oui
		Argile	Non
Présence de BPC ou autres produits chlorés (Cl) (possibilité de formation de dioxines)	25,0	Oui	Non
		Non	Oui
Phase libre (ContPL)	25,0	Oui	Non
		Non	Oui

5.4.4. Taux annuel d'enlèvement

Si l'efficacité d'une technologie peut être influencée par des paramètres associés au site et au contaminant, elle l'est également de par la quantité de contaminant à retirer, c'est-à-dire la différence entre les concentrations initiale et finale. Plus la quantité de contaminant à dégrader pour atteindre les objectifs de réhabilitation est grande, plus il sera difficile pour la technologie de réaliser ce traitement. Ainsi, par rapport à l'efficacité maximale de la technologie (efficacité établie uniquement à partir des paramètres associés au site et au contaminant), il y aura diminution de l'efficacité avec l'augmentation de cette quantité de contaminant à dégrader. Le paramètre « *Cible* » dans l'Équation 5-1 et l'Équation 5-2 représente ce facteur de réduction.

Selon des études de cas qui ont été répertoriées dans (Downey *et al.* 1995) et (Air Force Center for Environmental Excellence 1996), il est possible d'atteindre des taux annuels d'enlèvement du diesel par bioventilation allant jusqu'à 50 %. Au-delà de cette valeur, l'atteinte des objectifs de réhabilitation est plus difficile, ce qui équivaut à réduire l'efficacité de la technologie. Finalement, pour des taux annuels d'enlèvement du diesel supérieurs à 95 %, l'efficacité de la bioventilation est nulle (U.S. Environmental Protection Agency 1995). En posant l'hypothèse que l'efficacité n'est pas linéaire mais qu'elle décroît rapidement dès que le taux d'enlèvement annuel dépasse 50 %, une fonction exponentielle (Équation 5-3) peut être utilisée pour représenter l'évolution négative du paramètre « *Cible* » selon ce taux. La Figure 5-6 illustre cette évolution.

$$Cible = 2154{,}4 \cdot e^{-15{,}351 \cdot \text{Taux annuel d'enlèvement}}$$

Équation 5-3 Facteur de réduction de l'efficacité de la bioventilation.

L'utilisation du paramètre « *Cible* » permet l'évaluation des probabilités d'atteindre différentes situations (plages) de contamination à partir d'une concentration établie. L'encadré 5.2 présente un exemple de calculs des probabilités d'occurrence d'atteindre différentes situations à partir d'une contamination donnée en utilisant la bioventilation. Cet exemple se base sur le calcul de l'efficacité maximale de cette technologie tel que présenté dans l'encadré 5-1.

La littérature sur des cas de réhabilitation par biobarbotage de la zone saturée contaminée au diesel n'est pas suffisante pour fixer un taux annuel d'enlèvement. Il a donc été choisi d'utiliser le même profil de réduction de l'efficacité qu'utilisé pour la bioventilation. Cette hypothèse est relativement conservatrice puisque le traitement dans la zone saturée peut être plus facile que dans la zone vadose.

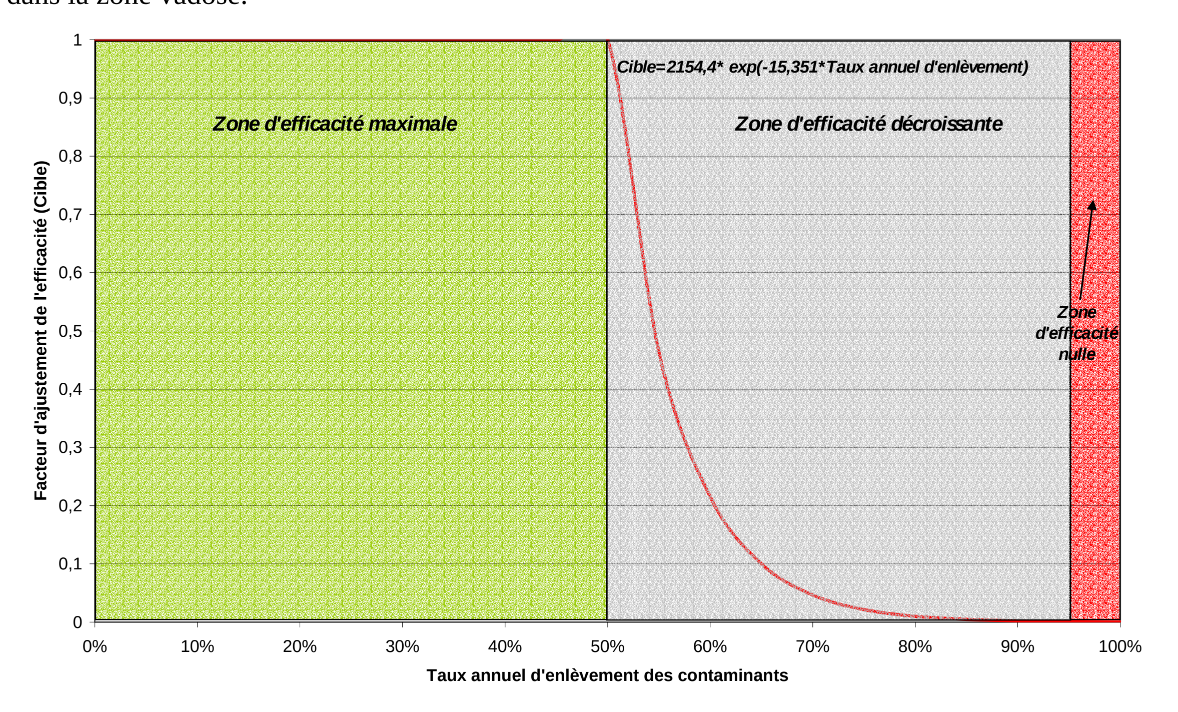


Figure 5-6 Ajustement de l'efficacité de la bioventilation selon les concentrations initiale et finale pour une période d'une année.

Encadré 5-2 Exemple de calculs des probabilités d’occurrence

Soit trois situations (plages de concentrations) définissant l’état du site:

< 700 mg diesel/kg	(<B)	Utilisation résidentielle
700 à 3 500 mg diesel/kg	(B-C)	Utilisation commerciale
>3 500 mg diesel/kg	(>C)	Utilisation industrielle

La définition de ces plages correspond aux critères génériques du Ministère de l’environnement du Québec (1998).

Soit une concentration initiale de 6 145 mg/kg et une efficacité maximale pour la bioventilation *in situ* de 75,6 % (voir l’encadré 5-1).

Les taux annuels d’enlèvement pour atteindre les situations dans lesquelles le site n’est pas initialement et les valeurs du paramètre *Cible* qui y sont associées sont les suivants:

Concentration initiale	Concentration maximale de la plage finale	Taux anuel d’enlèvement	*Cible*
6 145 mg/kg	3 500 mg/kg	43,0 %	100%
6 145 mg/kg	700 mg/kg	88,6 %	0,267 %

La probabilité d’atteindre, à partir de la concentration initiale, une concentration dans la situation <B est obtenue en multipliant l’efficacité maximale de la bioventilation *in situ* et la valeur *Cible* pour cet objectif de restauration, soit 75,6 % x 0,267 %= 0,2 %.

Pour ce qui est de la probabilité d’atteindre une concentration dans la situation B-C à partir de la concentration initiale, il faut au produit entre l’efficacité maximale de la bioventilation *in situ* et la valeur *Cible* pour cet objectif de restauration (75,6% x 100%= 75,6 %) en retrancher la probabilité d’atteindre toutes les situations inférieures à celle de cet objectif de restauration, soit uniquement la situation <B dans cet exemple, donc 75,6 % - 0,2% = 75,4 %. Cette réduction est nécessaire car pour atteindre la situation <B, il a fallu au préalable atteindre la situation B-C.

Finalement, il est possible que la bioventilation *in situ* soit peu efficace et que la concentration finale soit encore dans la situation initiale (>C). Dans ce cas, aucun taux d’enlèvement ne peut être calculé. La probabilité d’occurrence de ce cas de figure est obtenue en soustrayant de l’unité, les probabilités d’occurrence de toutes les situations inférieures à la situation initiale, soit 100 % - 75,4 % - 0,2 %= 24,4 %

Situation initiale	Situation finale	Probabilité d’occurrence
>C	<B	0,2 %
>C	B-C	75,4 %
>C	>C	24,4 %

5.5. Évaluation de la qualité des données

Tout logiciel d'aide à la gestion ou à la décision doit orienter l'utilisateur vers une solution favorisant l'atteinte des objectifs qu'il a fixés. Or, si la qualité des données introduites par l'utilisateur n'est pas de haut niveau, c'est-à-dire qu'il existe une incertitude quant à la valeur exacte de ces données en raison d'un manque de connaissance ou de l'utilisation de vieilles données, l'utilisateur devra réduire la confiance qu'il peut mettre dans la solution. C'est pour cette raison que le logiciel SITE VII est pourvu d'un module d'évaluation de la qualité des données. Ce module a pour objectif d'aider l'utilisateur à porter un jugement qualitatif sur la représentativité de la solution qu'il obtient du logiciel.

Lors de la saisie des données (étape nécessaire pour l'évaluation de l'efficacité des technologies), l'utilisateur doit qualifier la qualité de chaque donnée quant à sa source ou son âge. Trois seuils de qualité sont possibles :

1) une qualité FAIBLE (valeur de la qualité : 1): une valeur par défaut, une donnée non spécifique au site (moyenne régionale);
2) une qualité MOYENNE (valeur de la qualité : 2): une donnée provenant d'une analyse préliminaire, une donnée spécifique au site mais relativement ancienne;
3) une qualité FORTE (valeur de la qualité : 3): une valeur mesurée récemment sur le site par une méthode appropriée.

Tout comme pour l'efficacité d'une technologie, l'influence de la qualité de la donnée d'un paramètre n'est pas la même sur la qualité générale selon que ce paramètre a une importance plus ou moins grande face à la technologie. Ainsi, les pondérations réalisées pour les technologies (voir la 5.4.3) sont également utilisées dans ce module d'évaluation de la qualité des données. Cette fois-ci, au lieu de pondérer les notes des paramètres, il s'agit de pondérer les valeurs des qualités des données (1, 2 ou 3). Cette qualité générale pondérée ($Q_{\text{Générale info}}$), variant de 1 à 3, est par la suite transformée, pour des raisons de facilité d'interprétation, en un pourcentage. Cette transformation est réalisée à l'aide d'une fonction d'utilité représentant la perception de l'utilisateur quant à la qualité de l'information.

Pour des raisons d'uniformité, la Chaire utilise la même fonction d'utilité pour transformer la qualité d'une donnée en un pourcentage et ce, dans tous ses logiciels *SITE* depuis la création du logiciel *SITE V*[1]. L'utilisateur doit en début d'utilisation du logiciel définir sa perception de la qualité (le pourcentage de certitude qu'il associe) des informations de faible qualité (Q_{faible}) et de forte qualité (Q_{Forte}). La perception de la qualité moyenne d'une information est automatiquement calculée (voir l'Équation 5-4) en considérant qu'il y a un accroissement plus grand de la qualité d'une information lors du passage d'une donnée de qualité faible à moyenne que d'une donnée de qualité moyenne à forte.

$$Q_{Moyenne} = \frac{Q_{Forte} - Q_{faible}}{\log(100) / \log(e)} \cdot \frac{\log(50)}{\log(e)} + Q_{faible}$$

Équation 5-4 Ajustement de la perception d'une donnée de qualité moyenne.

---

[1] SITE V, Version 1.0 Bêta : Outil d'évaluation de l'atténuation naturelle applicable aux eaux souterraines contaminées aux HAP. Logiciel développé par la Chaire industrielle CRSNG en assainissement et gestion des sites, École Polytechnique de Montréal, 2002.

Les valeurs de tous les paramètres saisis par l'utilisateur, à l'exception des données de contamination (concentration), représentent une tendance générale sur l'ensemble du site. Il y a donc pour chacun de ces paramètres une valeur de qualité. Les données de concentration pour leur part couvrent plus ou moins l'ensemble du site. Il y a donc autant de qualités d'information qu'il y a de points de concentration sur le site. Dans ce cas particulier, la valeur de la qualité considérée dans le calcul de la qualité générale de l'information est une simple moyenne arithmétique de toutes les qualités. Cette moyenne est permise, contrairement au calcul de la concentration moyenne sur le site, car il n'y a pas de lien physique (ou d'influence) entre les qualités des différents points de concentration.

Pour chaque technologie, une valeur générale de l'information est calculée ($Q_{\text{Générale info}}$) et par la suite transformée en pourcentage de certitude à l'aide de l'Équation 5-5.

$$\%\,Q_{\textit{Générale Info}} = \begin{cases} \dfrac{Q_{Forte} - Q_{faible}}{\log(100) / \log(e)} \cdot \dfrac{\log(49 \cdot Q_{\text{Generale info}} - 48)}{\log(e)} + Q_{faible} & ; Q_{\textit{Générale Info}} < 2 \\[2ex] \dfrac{Q_{Forte} - Q_{faible}}{\log(100) / \log(e)} \cdot \dfrac{\log(50 \cdot Q_{\text{Generale info}} - 50)}{\log(e)} + Q_{faible} & ; Q_{\textit{Générale Info}} \geq 2 \end{cases}$$

Équation 5-5 Transformation de la qualité de l'information générale en un pourcentage.

L'encadré 5-3 présente un exemple du calcul de la qualité moyenne de l'information associée à un traitement par bioventilation. Il n'est pas improbable qu'un scénario de réhabilitation soit composé de plus d'une technologie utilisée séquentiellement. Dans ce cas, la qualité générale de l'information qui est associée au scénario est la qualité la plus faible de toutes les technologies composant ce scénario.

Encadré 5-3 Exemple de calculs de la qualité des données

Soit les paramètres suivants influençant la réhabilitation de la zone vadose par bioventilation et leurs qualités telles que saisies par l'utilisateur.

- Perméabilité intrinsèque (PI): Faible (1)
- Stratigraphie du sol (SS): Faible (1)
- pH du sol (pH): Moyenne (2)
- Teneur en humidité (TH): Faible (1)
- Température du sol (TS): Moyenne (2)
- Profondeur de la nappe phréatique (PNp): Forte (3)
- Volatilité (Vo): Faible (1) – Valeur attribuée automatiquement par le logiciel

Pour la concentration en contaminant, la moyenne de la qualité (numérique) des 50 points de concentration sur le site est de 2,3. En sommant les produits entre la qualité d'un paramètre et son poids (paramètres ayant une influence sur la technologie seulement, voir le Tableau 5-6), la qualité moyenne des données saisies associée à la bioventilation est de:

$$Qualité_{\text{Bioventila tion}} = \cdots$$
$$\cdots \frac{10,5 \cdot 1 + 4,55 \cdot 1 + 10,5 \cdot 2 + 2,1 \cdot 1 + 1,25 \cdot 2 + 21,1 \cdot 3 + 25,0 \cdot 1 + 25,0 \cdot 2,3}{100}$$
$$Qualité_{\text{Bioventila tion}} = 1,86$$

Soit les interprétations suivantes de l'utilisateur quant à la signification des niveaux de qualité:

- Qualité faible: 30% de certitude
- Qualité forte: 100% de certitude

En utilisant l'Équation 5-5, la qualité des données associées à la bioventilation est traduite en une certitude qui tient compte de la perception de l'utilisateur de la signification des niveaux de qualité des données.

$$\%\,\mathrm{Q}_{Générale\ Info} = \frac{Q_{Forte} - Q_{faible}}{\log(100)/\log(e)} \cdot \frac{\log(49 \cdot Q_{\text{Generale info}} - 48)}{\log(e)} + Q_{faible}$$

$$\%\,\mathrm{Q}_{Générale\ Info} = \frac{100 - 30}{\log(100)/\log(e)} \cdot \frac{\log(49 \cdot 1,86 - 48)}{\log(e)} + 30$$

$$\%\,\mathrm{Q}_{Générale\ Info} = 87,2\%$$

Ainsi, la certitude associée à la bioventilation en raison de la qualité des données saisies et ayant une influence sur cette technologie est de 87,2%.

6. Pertinence du logiciel

Ce chapitre traite de l'utilisation du logiciel SITE VII comme d'un outil d'aide à la gestion de la réhabilitation des sites contaminés par des hydrocarbures pétroliers. L'objectif de ce chapitre est de mettre en lumière les avantages à utiliser ce logiciel pour identifier une stratégie de réhabilitation comparativement à une approche plus classique, voire une sélection manuelle d'une telle stratégie. Le logiciel SITE VII est présenté dans ce chapitre comme étant un logiciel d'aide à la gestion, mais également un logiciel d'évaluation économique et un logiciel comparatif.

6.1. Logiciel d'aide à la gestion

La fonction première du logiciel SITE VII est d'établir, pour un site donné, une stratégie de réhabilitation. Cette stratégie sera la réponse, en terme de prise de décision, à la considération de diverses sources d'incertitudes quant à l'atteinte des objectifs de réhabilitation. Les deux sources principales d'incertitudes, abstraction faite des incertitudes sur les données, sont la connaissance du niveau réel de contamination du site et l'efficacité des technologies considérées. En présence d'une incertitude sur le niveau initial de contamination et d'une efficacité variable de la technologie considérée, l'atteinte des objectifs de réhabilitation ne peut être étudiée que dans un cadre stochastique. Selon les différentes valeurs que peuvent prendre ces paramètres incertains, l'éventail des embranchements possibles peut rapidement se complexifier. Si le processus décisionnel est répétitif dans le temps, c'est-à-dire qu'il est permis de revoir sa décision dans le temps, l'identification de tous les cas de figure possibles donne un éventail encore plus dense. Lors de l'identification manuelle de la séquence optimale de décision dans pareilles circonstances, il n'est pas impossible d'oublier certaines occurrences ou encore de simplifier l'ensemble des valeurs possibles afin de réduire la quantité de choix à analyser. C'est dans un tel contexte que les outils d'aide à la gestion et d'aide à la décision prennent de la valeur. Ils permettent de considérer toutes les occurrences découlant des valeurs possibles et ce, en une fraction du temps que prendrait l'être humain à le faire.

Ainsi, le logiciel SITE VII peut identifier parmi des dizaines et des dizaines de stratégies de réhabilitation, celle étant optimale d'un point de vue économique tout en favorisant l'atteinte des objectifs de réhabilitation. Devant la rapidité d'exécution, toujours comparativement à l'être humain, les limitations quant aux nombres de choix pouvant être considérés (nombre de technologies, nombre de situations définissant l'état du site, nombre maximal d'années de réhabilitation) sont d'un tout autre ordre de grandeur. Il est ainsi possible d'analyser l'utilisation séquentielle de différentes technologies et ce, toujours dans l'idée d'identifier la stratégie optimale de réhabilitation.

Comme tout logiciel d'aide à la gestion ou à la décision, l'utilisateur demeure le décideur final. Néanmoins, sans spécifier à l'utilisateur quel sera le scénario qui se réalisera réellement, l'utilisation de SITE VII lui permet de prendre connaissance, de manière détaillée, de l'ensemble des occurrences qui pourront résulter d'une décision. Cette prise de conscience lui permettra, peu importe le résultat d'une décision, de réagir à ce résultat en réorientant (si besoin il y a) la réhabilitation du site de manière à en maximiser les chances de succès.

6.2. Logiciel d'évaluation économique

Le logiciel SITE VII peut également être considéré comme un outil facilitant l'évaluation économique d'une technologie de réhabilitation d'un site. Sans utiliser le logiciel jusqu'à l'exécution de la simulation de la réhabilitation, un utilisateur pourrait se servir du module d'évaluation économique, et ainsi des bases de données économiques unitaires fournies avec le logiciel, afin d'estimer les coûts (fixes et variables) d'une technologie. Une telle estimation

pourrait être faite à partir du dimensionnement d'une technologie fait à l'interne ou par un consultant et ce, dans le but d'évaluer ou de contre évaluer les coûts associés à cette technologie.

Toujours à partir de ce module d'évaluation économique, il est possible d'analyser l'impact économique d'une modification dans le dimensionnement d'une technologie. L'ajout ou le retrait d'éléments requis par la technologie entraînera une hausse ou une baisse des coûts fixes ou variables de la technologie par rapport à la valeur économique d'un dimensionnement de base (de référence).

6.3. Logiciel comparatif

La rapidité d'exécution d'un outil d'aide à la gestion comparativement à l'être humain, telle qu'abordée à la section 6.1, permet également à l'utilisateur de se servir du logiciel SITE VII comme d'un outil comparatif. Une fois le site caractérisé dans le logiciel, c'est-à-dire une fois les stations de concentrations saisies et les paramètres du site définis, il est possible pour ce même et unique site, de définir différentes simulations ayant chacune des particularités (par exemple une limitation des technologies possibles, l'obligation d'utiliser une technologie en particulier à une période donnée de la réhabilitation, la possibilité ou non d'améliorer les connaissances du décideur par une acquisition d'information supplémentaire). Ces différentes simulations peuvent représenter l'approche couramment utilisée par une firme, le plan de réhabilitation suggéré par un consultant, différentes approches que veulent étudier l'équipe d'ingénieurs responsable de la réhabilitation d'un site. En réalisant les unes à la suite des autres toutes ces simulations, ainsi que la simulation optimale, il est possible de comparer leurs stratégies respectives et ainsi d'avoir plus d'information en main pour faire le choix final quant à la stratégie à employer pour réhabiliter le site.

7. Conclusion

Ce rapport conclue la seconde phase du projet de développement d'un outil de gestion considérant les risques économiques pour la réhabilitation d'un site contaminé aux hydrocarbures pétroliers. L'objectif de cette seconde phase était de réaliser ce logiciel d'aide à la gestion dont la structure avait été mise sur papier lors de la première phase du projet en novembre 2001. Le manuel d'utilisation du logiciel SITE VII, contenant lui-même un disque d'installation du logiciel, est complémentaire de ce rapport. En plus d'aborder l'aspect utilisation du logiciel, il détaille les différentes données requises par le logiciel.

La réalisation de ce logiciel a nécessité le développement des différents modules. Ainsi, un algorithme à deux étapes a été créé afin de pouvoir utiliser le modèle *METEORS* qui est à la base de la structure du logiciel. La réalisation de cet algorithme représentait une étape cruciale du développement du logiciel. Cet algorithme a la particularité d'emmagasiner dans une base de données, toutes les données décisionnelles, économiques, probabilistes et temporelles associées à tous les choix de réhabilitation. Ceci a permis d'élargir le champ d'utilisation du logiciel en ne le limitant pas à la recherche de la stratégie optimale, mais également à toutes stratégies particulières respectant diverses consignes de l'utilisateur. Un module permettant de prendre en considération l'incertitude associée au niveau réel de contamination sur le site a également été développé. Ce module génère, à partir des données de concentration connues, une distribution des probabilités d'occurrence que la concentration moyenne du site se situe dans chacune des situations (plages de contamination) définies. L'application d'une technologie sur un site défini par un tel état permettra d'atteindre de nouveaux états représentant un site plus ou moins contaminé et ce, selon l'efficacité de la technologie considérée. L'évaluation de ces efficacités est assurée dans le logiciel SITE VII par un module entièrement destiné à cet effet. Ce module prend en considération les valeurs saisies par l'utilisateur et représentant différents paramètres biologiques, hydrogéologiques et physiques du site. Finalement, puisque le logiciel SITE VII considère à la fois les aspects techniques de la réhabilitation et les aspects économiques, un module d'évaluation des coûts d'application d'une technologie (module couplé à une base de données économiques unitaires) permet à partir du dimensionnement d'une technologie d'en établir ses coûts fixes et ses coûts variables.

Le logiciel SITEVII permet au gestionnaire d'un site contaminé d'identifier la stratégie à suivre pour réhabiliter ce dernier et ce, en respectant diverses contraintes économiques, techniques et temporelles. L'analyse, par le logiciel, de cette stratégie permet également au gestionnaire de répondre à des questions importantes lors de l'identification de l'approche à utiliser pour traiter un site, à savoir quelles sont les valeurs espérées des coûts (ou bénéfices) associés à la réhabilitation et de la durée de cette dernière. Il est également possible, en connaissant les probabilités d'occurrence des scénarios composant la stratégie de réhabilitation, d'évaluer les chance de succès de cette stratégie et de la comparer au risque (occurrence d'un scénario à valeur économique négative par exemple) que le gestionnaire est prêt à accepter pour le projet de réhabilitation du site. Le logiciel SITE VII ne se limite pas en un outil d'aide à la gestion en identifiant la stratégie à appliquer sur le site, il permet également, par l'intermédiaire du module économique, d'estimer les coûts d'application d'une technologie. Il permet également de comparer différentes approches de réhabilitation d'un même site et ainsi, il donne au gestionnaire davantage de résultats sur lesquels il peut baser son choix final.

8. Références

Air Force Center for Environmental Excellence (1996): Bioventing: Performance and cost results from multiple air force test sites, Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Texas

Bage, G. F., B. Sinclair-Desgagné and R. Samson (2002): A Technicoeconomic Approach for the Selection of Site Remediation Strategy- Part A: Theory. Environmental Management **30**(6): 807-815

Bage, G. F., B. Sinclair-Desgagné and R. Samson (2003): A Technicoeconomic Approach for the Selection of Site Remediation Strategy- Part B: Model Application. Environmental Management **31**(1): 69-78

Downey, D. C., P. R. Guest and J. W. Ratz (1995): Results of a two-year in situ bioventing demonstration. Environmental Progress **14**(2): 121-125

Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, Oxford

Jorgensen, K. S., J. Puustinen and A.-M. Suortti (2000): Bioremediation of petroleum, hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. Environmental Pollution **107**(2): 245-254

Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process. McGraw-Hill, New York

Saaty, T. L. (1981). Decision making for leaders. LifeTime Learning Publications, Belmont, California

Saaty, T. L. (1994): How to make a decision: The analytic hierarchy process. Interfaces **24**(6): 19-43

U.S. Environmental Protection Agency (1995): How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites: A guide for corrective action plan reviewers, EPA/510/B-95/007. U.S. E.P.A., Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC.

von Fahnestock, F. M., G. B. Wickramanayake, R. J. Kratzke and W. R. Major (1998). Biopile design , operation and maintenance handbook for treating hydrocarbon-contaminated soils. Battelle Press, Columbus

Annexe A. Grilles de pondération des paramètres influençant les technologies

A.1. Relations de préférence

Le paramètre A … est	aussi important	1	… que le paramètre B
	légèrement plus important	3	
	plus important	5	
	nettement plus important	7	
	beaucoup plus important	9	

A.2. Aspiration

Paramètres associés au site		
Le paramètre…	*… est …*	*… que le paramètre*
Perméabilité intrinsèque (PI)	1	Stratigraphie du sol (SS)
Perméabilité intrinsèque (PI)	9	pH du sol (pH)
Perméabilité intrinsèque (PI)	7	Teneur en humidité du sol (TH)
Perméabilité intrinsèque (PI)	9	Température du sol (TS)
Perméabilité intrinsèque (PI)	5	Profondeur de la nappe (PNp)
Stratigraphie du sol (SS)	9	pH du sol (pH)
Stratigraphie du sol (SS)	7	Teneur en humidité du sol (TH)
Stratigraphie du sol (SS)	9	Température du sol (TS)
Stratigraphie du sol (SS)	7	Profondeur de la nappe (PNp)
Teneur en humidité du sol (TH)	5	pH du sol (pH)
pH du sol (pH)	1	Température du sol (TS)
Profondeur de la nappe (PNp)	3	pH du sol (pH)
Teneur en humidité du sol (TH)	3	Température du sol (TS)
Profondeur de la nappe (PNp)	5	Teneur en humidité du sol (TH)
Profondeur de la nappe (PNp)	7	Température du sol (TS)
Paramètres associés au contaminant		
Le paramètre …	*… est …*	*… que le paramètre*
Volatilité (Vo)	9	Concentration en contaminant (CC)

A.3. Biobarbotage

Paramètres associés au site		
Le paramètre …	*… est …*	*… que le paramètre*
Conductivité hydraulique (PI)	1	Stratigraphie du sol (SS)
Conductivité hydraulique (PI)	7	pH de l'eau (pH)
Conductivité hydraulique (PI)	9	Température de l'eau (TS)
Conductivité hydraulique (PI)	7	Profondeur de la nappe (PNp)
Conductivité hydraulique (PI)	1	Concentration en fer dissous (FD)
Stratigraphie du sol (SS)	7	pH de l'eau (pH)
Stratigraphie du sol (SS)	9	Température de l'eau (TS)
Stratigraphie du sol (SS)	7	Profondeur de la nappe (PNp)
Stratigraphie du sol (SS)	1	Concentration en fer dissous (FD)
pH de l'eau (pH)	3	Température de l'eau (TS)
pH de l'eau (pH)	7	Profondeur de la nappe (PNp)
Concentration en fer dissous (FD)	7	pH de l'eau (pH)
Température de l'eau (TS)	1	Profondeur de la nappe (PNp)
Concentration en fer dissous (FD)	9	Température de l'eau (TS)
Concentration en fer dissous (FD)	9	Profondeur de la nappe (PNp)
Paramètres associés au contaminant		
Le paramètre …	*… est …*	*… que le paramètre*
Solubilité (So)	1	Concentration en contaminant (CC)

A.4. Bioventilation

Paramètres associés au site		
Le paramètre …	*… est …*	*… que le paramètre*
Perméabilité intrinsèque (PI)	3	Structure du sol (SS)
Perméabilité intrinsèque (PI)	1	pH du sol (pH)
Perméabilité intrinsèque (PI)	7	Teneur en humidité du sol (TH)
Perméabilité intrinsèque (PI)	9	Température du sol (TS)
Profondeur de la nappe (PNp)	3	Perméabilité intrinsèque (PI)
pH du sol (pH)	3	Structure du sol (SS)
Structure du sol (SS)	3	Teneur en humidité du sol (TH)
Structure du sol (SS)	5	Température du sol (TS)
Profondeur de la nappe (PNp)	5	Structure du sol (SS)
pH du sol (pH)	7	Teneur en humidité du sol (TH)
pH du sol (pH)	9	Température du sol (TS)
Profondeur de la nappe (PNp)	3	pH du sol (pH)
Teneur en humidité du sol (TH)	3	Température du sol (TS)
Profondeur de la nappe (PNp)	9	Teneur en humidité du sol (TH)
Profondeur de la nappe (PNp)	9	Température du sol (TS)
Paramètres associés au contaminant		
Le paramètre …	*… est …*	*… que le paramètre*
Volatilité (Vo)	1	Concentration en contaminant (CC)